

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Optimalizace EH antény
EH Antenna Optimisation

2017

Lukáš Černý

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Lukáš Černý

Studijní program:

N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601T013 Telekomunikační technika

Téma:

Optimalizace EH antény
EH Antenna Optimisation

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

EH anténa je specifický typ antény. Práce si klade za cíl rozbor funkce antény a ověření vztahů pro konstrukci antény.

Vypracování práce bude splňovat následující body zadání:

1. Popište základní princip funkce EH antény.
2. Popište základní matematický aparát pro výpočet konstrukčních a elektrických parametrů antény.
3. Vytvořte model antény v programu CST Studio.
4. Proveďte optimalizace rozměrů a pomocných obvodů antény vzhledem k parametru S11.
5. Popište vlivy rozměrů a pomocných obvodů na parametry antény.
6. Proveďte teoretické vztahy konstrukcí antény na zadaném kmitočtu.
7. Ověřte a vyhodnoťte správnost konstrukce měřením základních vlastností antény.

Seznam doporučené odborné literatury:


BALANIS, Constantine. *Antenna Theory : Analysis and design*. 3rd edition. United States : Wiley, 2005. 1117 s. ISBN 0-471-66782-X.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Marek Dvorský, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2016

Datum odevzdání: 28.04.2017


doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry





prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 26. dubna 2017


.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval pánům Ing. Marku Dvorskému, Ph.D. a Tedu Hartovi za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této diplomové práce.

Abstrakt

EH anténa je specifický typ antény, její úplný název zní elektromagnetická elektricky krátká anténa. Základním rysem je rozložení elektromagnetického pole. Elektrická složka E a magnetická složka H jsou na sebe navzájem kolmé. Hlavní výhodou EH antény jsou její malé rozměry oproti klasickým anténám. EH anténa má však i nevýhody, především její opětovné ladění při každém přemístění, není tedy vhodná pro mobilní použití. Cílem této práce je popis teorie EH antény a popis principu její funkce. Dále simulace v programu CST Microwave studio a analýza vlivů změn rozměrů a nastavení antény na její vlastnosti. Tyto zjištěné vztahy poté zaznamenat a použít při praktické realizaci. Po ukončení návrhu antény v programu je dalším bodem sestrojení zadaného typu antény a praktickým měřením ověřit teoretické vztahy a vlastnosti získané při simulacích.

Klíčová slova

CST Microvawe Studio, EH anténa, optimalizace, simulace, výroba

Abstract

EH antenna is specific type of antenna, full title electromagnetic electrically short antenna. The basic trait is the electromagnetic field distribution. The electrical element E and the magnetic element H are perpendicular to one another. The main advantage of EH antenna is its small size compared to conventional antennas. However, it has disadvantages as well. The biggest one is a principally tuning at every transfer, what eventually makes the antenna unsuitable for mobile use. The goal of this work is to describe the theory of EH antennas and its function. Another goal is to perform a simulation in CST Microwave Studio and to analyze the impact of changes in dimensions and antenna settings on the properties. The observed relationships then used in the practical implementation, after the antennas construction according to the design created in CST Studio. Theoretical relationships and properties acquired during simulations in the practical measurement are verified and evaluated at the end of the thesis.

Key words

CST Microvawe Studio, EH antenna, optimalization, simulation, production

Obsah

| | |
|--|--------|
| Úvod..... | - 1 - |
| 1 Teoretický rozbor antény typu EH..... | - 2 - |
| 1.1 Obecný popis antén..... | - 2 - |
| 1.2 Vznik a vývoj EH antén..... | - 4 - |
| 1.2.1 Přizpůsobovací obvody EH antény | - 5 - |
| 1.3 Vlastnosti a popis EH antén | - 7 - |
| 1.4 Náhradní elektrický obvod EH antény | - 8 - |
| 1.5 Popis matematického aparátu..... | - 14 - |
| 2 Návrh antény v CST Microwave studio | - 16 - |
| 2.1 Návrh tvaru zářiče pro EH anténu..... | - 16 - |
| 2.2 Návrh přizpůsobovacího obvodu EH antény | - 21 - |
| 2.2.1 Přizpůsobovací obvod typu L..... | - 21 - |
| 2.2.2 Přizpůsobovací obvod typu T..... | - 23 - |
| 2.2.3 Přizpůsobovací obvod L+T | - 25 - |
| 2.2.4 Přizpůsobovací obvod EH 6 generace..... | - 26 - |
| 2.2.5 Přizpůsobovací obvod STAR | - 27 - |
| 2.3 Analýza vlivu rozměrů na parametry antény | - 29 - |
| 2.4 Optimalizace rozměrů a stanovení hodnot prvků obvodu STAR..... | - 31 - |
| 3 Konstrukce EH antény | - 34 - |
| 4 Měření zkonstruované antény | - 38 - |
| 4.1 Měření pomocí anténního analyzátoru RigExpert | - 38 - |
| 4.2 Měření pomocí vektorového analyzátoru SDR-Kits..... | - 39 - |
| 4.3 Měření indukčnosti cívky pomocí RLC můstku | - 41 - |
| 4.4 Praktické ověření činnosti antény | - 41 - |
| 5 Zhodnocení dosažených výsledků..... | - 42 - |
| 6 Závěr | - 44 - |
| Použitá literatura | - 45 - |

Seznam použitých symbolů

| Symbol | Jednotky | Význam symbolu |
|---|----------|-----------------------------|
| C | F | Kapacita |
| C₁, C₂ | - | Označení kondenzátorů |
| D | - | Činitel směrovosti |
| d | cm | Průměr |
| d_{cívky} | cm | Průměr cívky |
| d_s | μm | Tloušťka materiálu |
| d_{vodiče} | cm | Průměr vodiče |
| f | Hz | Frekvence |
| f₀ | Hz | Rezonanční frekvence |
| G | dBi | Zisk |
| k | - | Činitel poměru cívky |
| L | H | Indukce |
| L₁, L₂, L₃, L₄ | - | Označení cívek |
| l | cm | Délka |
| l_{vodiče} | cm | Délka vodiče |
| N | - | Počet závitů cívky |
| N_{fázovací} | - | Počet závitů fázovací cívky |
| N_{ladící} | - | Počet závitů ladící cívky |
| P₁ | W | Vstupní výkon |
| P₂ | W | Výstupní výkon |
| Q | - | Činitel jakosti |
| R | Ω | Odpor |
| R_a | Ω | Rezistance antény |
| R_L | Ω | Ztrátový odpor |
| R_p | Ω | Char. impedance napaječe |
| R_R | Ω | Odpor záření |
| S₁₁ | dB | Vstupní činitel odrazu |
| U_C | V | Napětí na kondenzátoru |

Seznam použitých symbolů

| | | |
|-----------|------------------------|-----------------------------|
| U_L | V | Napětí na cívce |
| U_R | V | Napětí na ztrátovém odporu |
| X_C | Ω | Kapacitní reaktance |
| X_L | Ω | Induktivní reaktance |
| X_A | Ω | Reaktance antény |
| Z | Ω | Impedance |
| λ | m | Vlnová délka |
| ρ | $\Omega \cdot mm^2/km$ | Měrná rezistivita materiálu |
| η_A | % | Účinnost antény |
| η | % | Účinnost |
| μ | $H \cdot m^{-1}$ | Magnetická permeabilita |

Seznam použitých zkratk

| Zkratka | Význam |
|-------------|--|
| BW | Šířka pásma |
| CB | Občanské rozhlasové pásmo |
| CST | Computer simulation technology |
| E | Intenzita elektrické pole |
| EH | Elektricky krátká |
| HAM | Radioamaterské vysílání (Hyman, Almy a Murray) |
| H | Intenzita magnetické pole |
| KV | Krátké vlny |
| PSV | Poměr stojatých vln |
| RF | Radiofrekvence |
| RFID | Radio frequency identification |
| VF | Vysokofrekvenční |

Seznam ilustrací a seznam tabulek

| Číslo ilustrace | Název ilustrace | Číslo stránky |
|-----------------|--|---------------|
| 1.1 | EH anténa | 2 |
| 1.2 | Fotografie autora EH antény Teda Harta | 4 |
| 1.3 | Porovnání Hertzovi antény s EH anténou | 5 |
| 1.4 | L+L článek | 5 |
| 1.5 | L+T článek | 6 |
| 1.6 | Zapojení Star | 6 |
| 1.7 | Typy zářičů Bi-cone, flat, cylindr | 8 |
| 1.8 | Přizpůsobovací obvod EH antény 6.generace | 8 |
| 1.9 | Náhradní obvod EH antény | 8 |
| 1.10 | Zjednodušený náhradní obvod EH antény | 9 |
| 1.11 | Úplný náhradní obvod EH antény | 9 |
| 1.12 | Typické parametry EH antény | 10 |
| 1.13 | Elektrické a magnetické pole EH antény | 11 |
| 1.14 | Vlastní detail EH antény | 11 |
| 1.15 | Kompletní schéma EH antény STAR | 13 |
| 1.16 | Cylindrový zářič s kótami | 14 |
| 2.1 | Model válcového zářiče | 16 |
| 2.2 | Vyzařovací charakteristika cylindrového zářiče | 17 |
| 2.3 | Model obdelníkového zářiče | 17 |
| 2.4 | Vyzařovací charakteristika obdelníkového zářiče | 18 |
| 2.5 | Model čtvercového zářiče | 18 |
| 2.6 | Vyzařovací charakteristika čtvercového zářiče | 19 |
| 2.7 | Model trojúhelníkového zářiče | 19 |
| 2.8 | Vyzařovací charakteristika trojúhelníkového zářiče | 19 |
| 2.9 | Model kuželového zářiče | 20 |
| 2.10 | Vyzařovací charakteristika kuželového zářiče | 20 |
| 2.11 | L článek v programu CST | 22 |
| 2.12 | Parametr S11 L článku | 23 |

| | | |
|------|---|----|
| 2.13 | T článek v programu CST | 24 |
| 2.14 | Parametr S11 T článku pro frekvenci 27,2 MHz | 24 |
| 2.15 | L+T článek v programu CST | 26 |
| 2.16 | Parametr S11 L+T článku pro frekvenci 27,2 MHz | 26 |
| 2.17 | Obvod 6.generace v programu CST | 27 |
| 2.18 | Parametr S11 obvodu 6.generace pro frekvenci 27,2 MHz | 27 |
| 2.19 | Obvod STAR v programu CST | 28 |
| 2.20 | Parametr S11 obvodu STAR pro frekvenci 27,2 MHz | 28 |
| 2.21 | Graf vlivu změny mezery na reaktanční složku | 30 |
| 2.22 | Graf vlivu změny průměru na reaktanční složku | 30 |
| 2.23 | Graf vlivu změny délky na reaktanční složku | 31 |
| 2.24 | Schéma konečného návrhu | 32 |
| 3.1 | Plánek antény pro nastavení rezonanční frekvence | 34 |
| 3.2 | Zhotovený cylindrový zářič | 35 |
| 3.3 | Upevnění koaxiálního konektoru | 36 |
| 3.4 | Finální plánek antény | 36 |
| 3.5 | Vytvořený model EH antény | 37 |
| 4.1 | Anténní analyzátor RigExpert | 38 |
| 4.2 | Graficky a číselně znázorněna hodnota PSV | 39 |
| 4.3 | Graficky znázorněna Re a Im složka, všechny parametry | 39 |
| 4.4 | Vektorový analyzátor SDR-Kits s kalibrační sadou | 39 |
| 4.5 | Průběh S11 a PSV | 40 |
| 4.6 | Průběh S11, reálné a imaginární složky impedance | 40 |
| 4.7 | RLC můstek ELC-3131 D | 41 |

| Číslo tabulky | Název tabulky | Číslo stránky |
|---------------|---|---------------|
| 2.1 | Rozměry zářičů EH antény podle Teda Harta | 16 |
| 2.2 | Hodnoty reaktancí jednotlivých zářičů | 21 |
| 2.3 | Hodnoty analyzovaných obvodů | 29 |
| 2.4 | Reaktanční složka antény při změně mezery mezi zářiči | 29 |
| 2.5 | Reaktanční složka antény při změně průměru zářičů | 30 |

Seznam ilustrací a seznam tabulek

| | | |
|------------|---|----|
| 2.6 | Reaktanční složka antény při změně délky zářičů | 31 |
| 2.7 | Konečné rozměry navržené antény | 32 |

Úvod

V této práci je cílem popsat specifický typ antény. Zmiňovaným typem je EH (elektricky krátká) anténa. Kapitola 1. se zabývá teoretickým popisem, kdy je malá část věnována obecnému seznámení s anténami, popisem vlastností antén a jejich parametrů. Poté je popis věnován pouze EH anténám, jejich vlastnostem, výhodám a nevýhodám. V kapitole 1.5 je popsán, matematický aparát pro výpočet konstrukčních a elektrických vlastností EH antén, to je důležité pro pochopení, jak EH antény fungují.

Kapitola 2. je věnována návrhu EH antény v programu CST (Computer Simulation Technology) Microwave Studio. Pomocí tohoto programu je možné navrhnout anténu virtuálně a experimentovat s jejími rozměry, analyzovat její vlastnosti pomocí simulací. Není tedy potřeba konstruovat několik různých antén a provádět reálná měření. Pomocí programu lze zjistit optimální rozměry pro zajištění vysoké účinnosti navržené antény a také provést optimalizaci rozměrů

Kapitola 3. je věnována již samotné konstrukci antény. Zde je přesně popsán návod, jak postupovat při výrobě EH antény. Tyto návody byly již několikrát publikovány radioamatéry. Nejvíce se na vývoji a zkoumání EH antén podílí radioamatér Ted Hart, který má ve vlastnictví tři patenty na tyto antény [1], [2], [3]. Ačkoli se jedná o poměrně jednoduchou konstrukci, jde o typ antény, která se vyvíjí teprve krátce. Ruský fyzik Vladimír Korobejnikov byl prvním, kdo sepsal podklady pro sestavení, jež do té doby byly známy pouze teoreticky.

Kapitola 4. je poslední částí práce kde se popisuje měření vyrobené antény. Při měření se ověří správnost sestaveného návrhu v programu, a zda jsou vhodně zvoleny rozměry antény, tak ať je zajištěna funkčnost na požadované frekvenci. Také se v tomto bodě ověří teoretické předpoklady, které jsou popsány v dřívější kapitole.

1 Teoretický rozbor antény typu EH



Obrázek 1.1: EH anténa

1.1 Obecný popis antén

Anténa je zařízení, které mění elektromagnetické vlny na elektrický signál (přijímací anténa) nebo opačně mění elektrický signál na elektromagnetické vlny (vysílací anténa). Je nenahraditelnou součástí každého systému pro rádiovou komunikaci. Na počátku byly antény používány hlavně pro bezdrátovou telegrafní komunikaci. V dnešní době jsou používány téměř ve všech odvětvích. Antény jsou umístěny v každém dopravním prostředku, jsou zabudovány v každém notebooku pro využití bezdrátových sítí apod. Anténu nejde nahradit žádným jiným elektronickým obvodem. Existuje mnoho druhů antén, které se liší vlnovou délkou, způsobem využití, konstrukcí, charakteristikou vyzařování atd. Každá anténa je také dána svými vlastnostmi, různé typy antén se liší právě vlastnostmi a hodnotami parametrů. Díky tomu můžeme určit, o jak účinnou anténu se jedná.

- Vstupní činitel odrazu S_{11} a poměr stojatých vln PSV - parametr S_{11} vyjadřuje přizpůsobení antény z hlediska odrazu. Vstupní činitel odrazu je jako útlum, který je vyjádřen v jednotkách dB nebo se udává jako bezrozměrná veličina ρ . Tento parametr je velmi důležitý pro kvalitní přizpůsobení antény, a tedy pro její správnou funkčnost. Parametr S_{11} je jeden z hlavních parametrů pro ověřování správné funkčnosti antény. Při zapojení přizpůsobovacího obvodu, by činitel odrazu u EH antén měl dosahovat hodnoty alespoň -10 dB. Převod mezi S_{11} a bezrozměrným činitelem odrazu je zobrazen na vztahu (1.1) [4]. S parametrem

činitele odrazu souvisí parametr PSV. Kterým lze hodnotit přizpůsobení k napájecí podle poměru stojatých vln. Ideálně přizpůsobená anténa má hodnotu PSV jedna. U EH antén závisí hodnota PSV na pečlivém naladění antény. Následující tabulka uvádí orientační hodnoty PSV. Pro činitel odrazu ρ a PSV platí vztah (1.2) [5].

- velmi dobré přizpůsobení: $PSV < 1,1$
- dobré přizpůsobení: $PSV < 1,5$ až 2
- vyhovující přizpůsobení: $PSV < 3$ až 5

$$\rho = 10^{\frac{S_{11}}{20}} \quad [-; \text{dB}] \quad (1.1)$$

$$PSV = \frac{1+|\rho|}{1-|\rho|} \quad [-; -] \quad (1.2)$$

- Impedance Z - je fyzikální veličina vyjádřena komplexním číslem, která označuje zdánlivý odpor součástky a fázový posun. Ideální hodnota impedance je $50+j0 \Omega$. Pokud není dosaženo této hodnoty impedance, vznikají tím ztráty a odrazy, jenž znehodnotí přenášenou informaci. Také u EH antén je nejčastější impedanční přizpůsobení na 50Ω [6].
- Zisk a směrovost antény - ve skutečnosti samotná anténa žádný zisk nemá. Úkolem antény je převést proud na elektromagnetické vlnění s účinností nejvýše 1. Pouze energii, kterou přivedeme na vstup, můžeme získat na výstupu. Není proto možné, uvažovat o zisku ve smyslu zesílení. Zisk antény se udává jako relativní číslo, které uvádí úroveň vyzařovaného signálu pouze do jednoho směru, proti vyzařovanému signálu všesměrovému. Vztah mezi ziskem antény a směrovostí nejde obejít, a je velmi důležitý pro pochopení, jak zacházet s anténami. Ve výsledku je tedy důležitější přizpůsobení antény, k co nejmenším ztrátám a vhodnému umístění než snaha o co největší katalogové hodnoty zisku. Činitel směrovosti D je poměr výkonů vyzařených vztažnou a zkoumanou anténou, obě tyto antény musí vytvořit ve směru, kde mají maximální vyzařování, stejnou intenzitu pole. Pokud se použije nesměrová anténa jako vztažná, pak se jedná o absolutního činitele směrovosti D [6].

Zisk antény lze vypočítat ze vztahu:

$$G = 10 \log \frac{P_2}{P_1} \quad [\text{dBi}; \text{W}, \text{W}] \quad (1.3)$$

Kde:

G - zisk antény

P_2 - výstupní výkon antény

P_1 - vstupní výkon antény

$$G = D \cdot \eta_A \quad [\text{dBm}; -, \%] \quad (1.4)$$

Kde:

G - zisk antény

D - činitel směrovosti

η_A - účinnost antény

- Účinnost antény η_A - je poměr výkonu, který daná anténa skutečně vyzařuje, proti výkonu přivedenému do antény. Účinnost antény společně s činitelem směrovosti S rozhodují, zda v požadovaném směru nastane zvýšení vyzařované energie. U EH antén závisí účinnost na zvolených rozměrech [7].
- Šum - jde o snahu zvýšit odstup signálu od šumu. Na samotné anténě však šum téměř nevzniká. Šum způsobuje až zesilovač v přijímači. Zesilovač vytváří více šumu, pokud je samotný přijímač nekvalitní nebo čím nižší nám dodává anténa signál. Prakticky platí, čím vyšší úroveň signálu dodává anténa, tím menšího šumu dostáváme při poslechu [6].
- Polarizace vln - elektromagnetické vlny se nešíří všemi směry, ale často jen v jedné rovině. Podle orientace kmitů vůči zemskému povrchu rozlišujeme tři druhy polarizace, kterými jsou horizontální, vertikální a kruhová. EH antény lze využívat v horizontální i vertikální poloze [7].

1.2 Vznik a vývoj EH antén

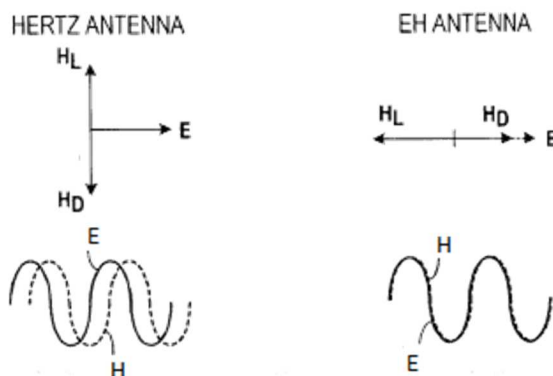
Autorem EH antén je Ted Hart obrázek (1.2), který získal licenci (W5QJR) v roce 1948. Díky časnému zájmu o radioamatérství, prožil dlouhou a úspěšnou kariéru jako elektro inženýr. Vynalezl několik jiných radioamatérských zařízení, například malou smyčkovou anténu. Elektricky krátká anténa vznikla roku 1996, ale do povědomí veřejnosti stále moc nepronikla. Koncept EH antény se skládá ze tří patentů [1], [2], [3]. Jelikož je tento typ antény odlišný od klasický modelů, uváděných v učebnicích, vědecká komunita přijala tyto materiály velice pomalu. Autorem jsou vytvořeny tři různé obvody pro zajištění fázového posunu na zářičích o -90° [8].



Obrázek 1.2: Fotografie autora EH antény Teda Harta

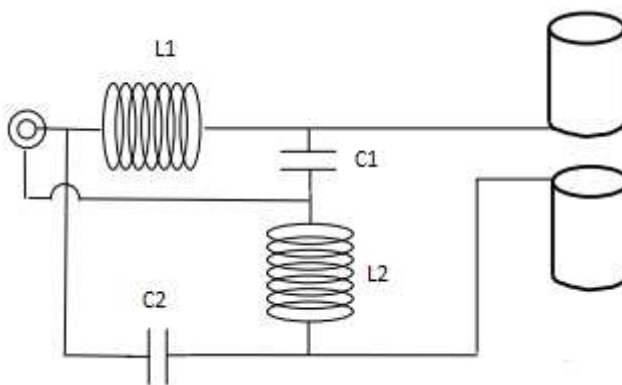
1.2.1 Přizpůsobovací obvody EH antény

Hlavním principem EH antény je pomocí přizpůsobovacího obvodu, který je přiveden mezi oba prvky antény (zářiče), zajistit fázový posun o -90° . To způsobí, že elektrické pole E a magnetické pole H, je na anténě ve fázi. Díky tomu dochází k elektromagnetickému záření v blízkosti antény, namísto záření ve vzdáleném poli, jak je to běžné u konvenčních antén. Jinak řečeno relativní fáze pole E a H je v přímém vztahu k fázi napětí a proudu. Pokud je přiveden proud, který je o 90° fázově opožděn vzhledem k přiváděnému napětí, je díky tomu pole E a H na anténě ve fázi. To lze vidět na obrázku (1.3), kde je porovnání Hertzovi antény s EH anténou. Na obrázcích (1.4, 1.5 a 1.6) jsou zobrazeny přizpůsobovací obvody navržené Tudem Hartem, které při správném nastavení zajistí potřebný fázový posun [8].



Obrázek 1.3: porovnání Hertzovi antény s EH anténou [2]

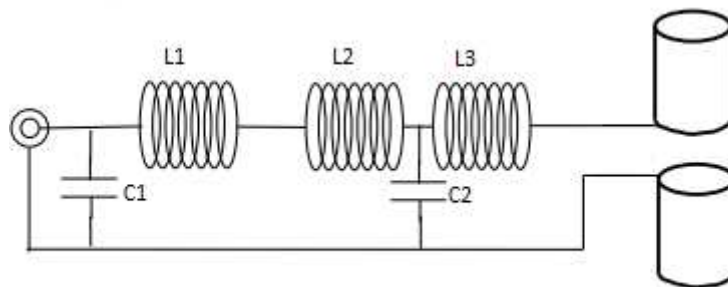
- L+L článek - tento obvod byl navržen jako první obrázek (1.4). První L článek (L_1C_1) poskytuje fázový posun -45° druhý L článek (L_2C_2) poskytuje také fázový posun -45° . Poměr L/C zajišťuje impedanční přizpůsobení na koaxiální kabel. Toto uspořádání funguje velmi dobře, a i když hodnoty kondenzátorů jsou nízké, musejí odolávat vysokému RF (radiofrekvenční) napětí [8].



Obrázek 1.4: L+L článek [8]

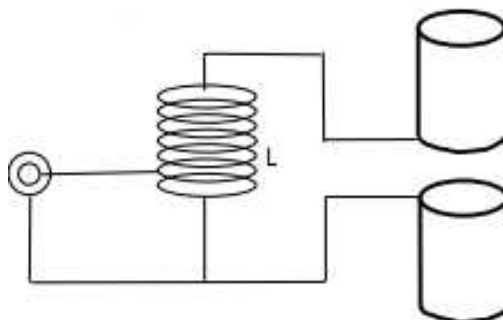
- L+T článek - jako druhá varianta je použit L+T článek obrázek (1.5). V typickém případě L článek (L_1C_1) přeměňuje 50 ohmů na 25 ohmů společně s fázovým posunem -45° . T článek ($L_2L_3C_2$) poté převede 25 ohmů na odpovídající impedanci antény a poskytne další fázový posun -45° . V tomto

zapojení mohou být použity kondenzátory pro nízké napětí, ale musí dosahovat vysoké RF proudové zatížitelnosti. Toto zapojení je velmi citlivé na fázový posun [8].



Obrázek 1.5: L+T článek [8]

▪ Star - posledním a preferovaným zapojením je Star obrázek (1.6). U tohoto zapojení je ladící cívka využita pro přizpůsobení na 50 ohmů pomocí vytvořené odbočky, a také je spodní strana cívky připojena ke koaxiálnímu stínění. Fázového posunu - 90° je opět dosaženo pomocí ladící cívky. Jelikož má toto zapojení minimum komponentů, byla pojmenovaná jako Star anténa (hvězda). Právě díky minimu součástí je dlouhodobě nejspolehlivější z uváděných třech modelů, proto je používána pro rozhlasové vysílání na krátkých vlnách KV [8]. Z tohoto typu zapojení vychází další typ antény, na které opět spolupracoval autor EH antény Ted Hart. Název této antény je vektorová Poyntingova anténa [9].



Obrázek 1.6: Zapojení Star [8]

EH antény jsou používány v různých aplikacích, rozhlasové vysílání KV, HAM (radioamatérské rádio). Na základě patentů vyrábí dvě firmy (Japonsko, Evropa) EH antény pro radioamatérské použití. Dále společnost v Itálii využívá princip EH antén pro komunikaci s miniaturními transpondéry, které slouží jako způsob čtení čárových kódů na dálku (RFID), u této aplikace přinesla EH anténa zlepšení oproti jiným typům [8].

1.3 Vlastnosti a popis EH antén

EH anténa, nebo také elektricky krátká anténa, vysílá nebo přijímá elektromagnetické vlny ve dvou vzájemně kolmých rovinách, což znamená, že jsou na sebe kolmé elektrické pole (E) společně s magnetickým polem (H). Tyto antény s sebou přináší několik výhod, ale také i nevýhody.

Výhody EH antén:

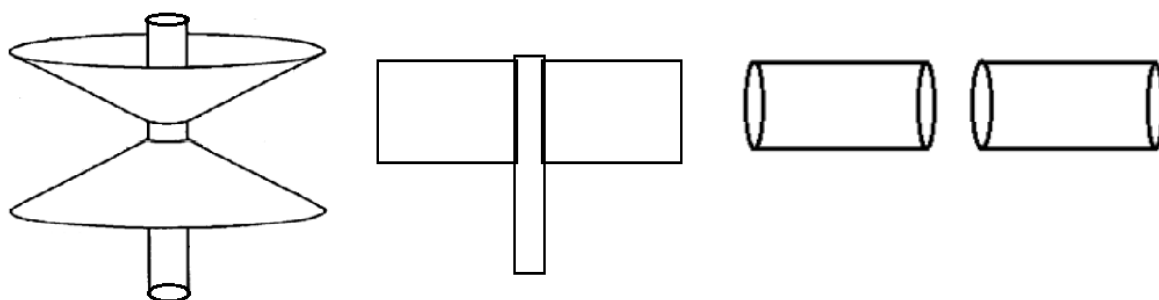
- Hlavní výhodou EH antén jsou její velmi malé rozměry oproti, kdy pro pásmo CB (občanské pásmo) je dostačující velikost EH antény pouze 50 cm což odpovídá přibližně 2 % z vlnové délky. Malé rozměry jsou vhodné pro použití v zastavěných oblastech nebo v místech, kde není dostatek prostoru pro vybudování rozměrné antény.
- Přes své malé rozměry dosahují tyto antény poměrně vysoké efektivity, hlavně pro příjem signálu. Jiné typy antén dosahují stejné efektivity při mnohonásobně vyšších rozměrech.
- Není zde potřeba silné magnetické nebo elektrické pole, díky tomu se u EH antén omezuje elektromagnetické rušení. Navíc nedochází k ovlivňování z místních E a H polí, díky čemuž se dosahuje při příjmu vysokého odstupu signálu od šumu.
- Při praktických pokusech, vyšlo najevo, že velikost EH antény závisí pouze na požadované účinnosti antény. Zvýšením rozměrů zářičů, lze dosáhnout vyšší účinnosti.
- Při správném nastavení antény, což je u tohoto typu velice důležité, EH anténa s délkou zářiče $0,005 \lambda$ (55 cm u CB) vyzáří více než $\lambda/2$ dipól klasické antény, za předpokladu, že je přesně nastavena. Velmi důležité je nastavení posunů fáze, které musí být velice přesné. Změna o $\pm 3^\circ$ znamená zhoršení poměru stojatých vln dvojnásobně a to z 1:1 na 2:1 [8].

Nevýhody EH antén:

- Hlavní nevýhodou této antény je její poměrně složité naladění oproti klasické prutové anténě. Samotnou anténu je možné výrazně ovlivnit místní homogenitou magnetického pole to znamená, že při mobilním používání této antény, je nutné ji při každém přemístění opět kompletně nastavit. K nastavení antény je nutný PSV měřič, ale také indikátor VF pole. Z toho důvodu není tento typ antény vhodný pro mobilní použití [8].

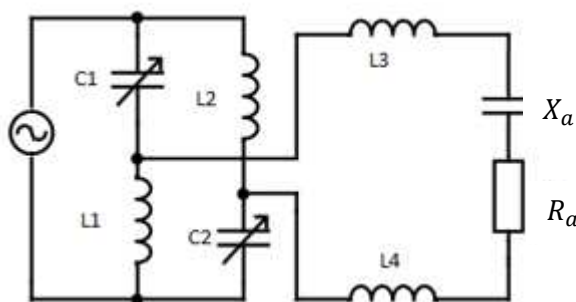
V části popisu modelu EH antény, jsou rozebrány jednotlivé konstrukční prvky antény a také stručný popis k čemu jednotlivé komponenty u dané antény slouží.

▪ Zářič (anténa) - zářič je nejdůležitějším prvkem, bez něj by nebylo možné přijímat nebo vysílat jakýkoliv signál. V případě této práce jsou jako zářič použity dva měděné cylindry (válce), avšak je možné použít i jiné typy zářičů. Dalšími typy zářičů mohou být dvě ploché měděné desky nebo dva kužely (Bi-cone) umístěny proti sobě. Funkcí antény je, jak bylo zmíněno přijímat nebo vysílat radiové signály. Při příjmu signálu přeměňuje elektromagnetické vlnění na elektrické a při vysílání opačně. Antény jsou navrženy tak, aby vyzařováno maximální množství elektrické energie.



Obrázek 1.7: typy zářičů kužel, plochý, cylindr

▪ Přizpůsobovací obvod - slouží ke správnému přizpůsobení antény, tj. nastavení správné rezonanční frekvence a tedy i správné nastavení impedance, ve většině aplikací EH antény to je 50 ohmů (koaxiální kabel). K popisu přizpůsobovacího obvodu je použit obvod EH antény 6. generace obrázek (1.8). Obvody L_1C_1 a L_2C_2 slouží ke správnému přizpůsobení antény na impedanci 50 Ω a také jejich pomocí nastavujeme co nejlepší hodnotu PSV. Cívky L_3 a L_4 které jsou umístěny mezi přizpůsobovacím obvodem a cylindry, mají funkci k zajištění malého množství fázového posunu a tím zabránit záření z vodičů, které jsou vedeny uvnitř antény, pro tento účel stačí u obou cívek dva závity. Sériový obvod R_aX_a zde je jako náhradní obvod antény.

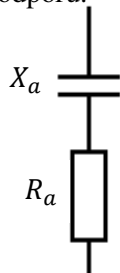


Obrázek 1.8: Přizpůsobovací obvod EH antény 6. generace

1.4 Náhradní elektrický obvod EH antény

V předchozí kapitole jsme si uvedli hlavní výhodu EH antén. Malé rozměry, přesto vysoká účinnost přibližně 95 %. V této kapitole je popsána teorie EH antén.

Na obrázku (1.9) je zobrazen náhradní obvod EH antény, jedná se o její vyzařovací část. Prakticky jde o sériové zapojení kapacity a odporu.



Obrázek 1.9: Náhradní obvod EH antény

Okamžitá hodnota šířky pásma této zjednodušené antény, je definovaná vztahem, který závisí na velikosti kapacity a odporu:

$$BW = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot f^2 \cdot C \quad [\text{Hz}; \Omega, \text{Hz}, \text{F}] \quad (1.5)$$

Kde:

BW - šířka pásma (pokles o 3dB)

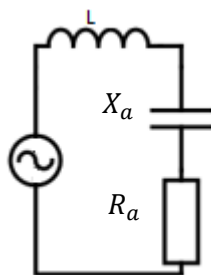
R - celkový odpor všech složek antény

f - pracovní kmitočet

C - kapacita antény

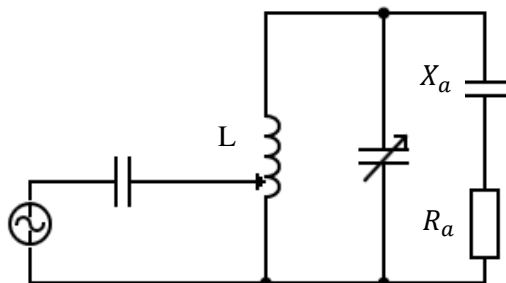
Z rovnice vyplývá, že při snížení odporu nebo kapacity, dojde ke snížení šířky pásma antény a platí to také opačně pro zvýšení odporu nebo kapacity. Proto se při výrobě EH antén využívá velkých ploch zářičů, to umožňuje vytvořit anténu malých rozměrů.

Aby byl možný průchod proudu, je potřeba vykompenzovat reaktanci kondenzátoru X_a . Vykompenzování reaktance se realizuje přidáním řady indukčností L, které mají stejnou hodnotu reaktance na požadovaném kmitočtu. Přidáním indukčností vznikne následující rezonanční obvod obrázek (1.10) [10].



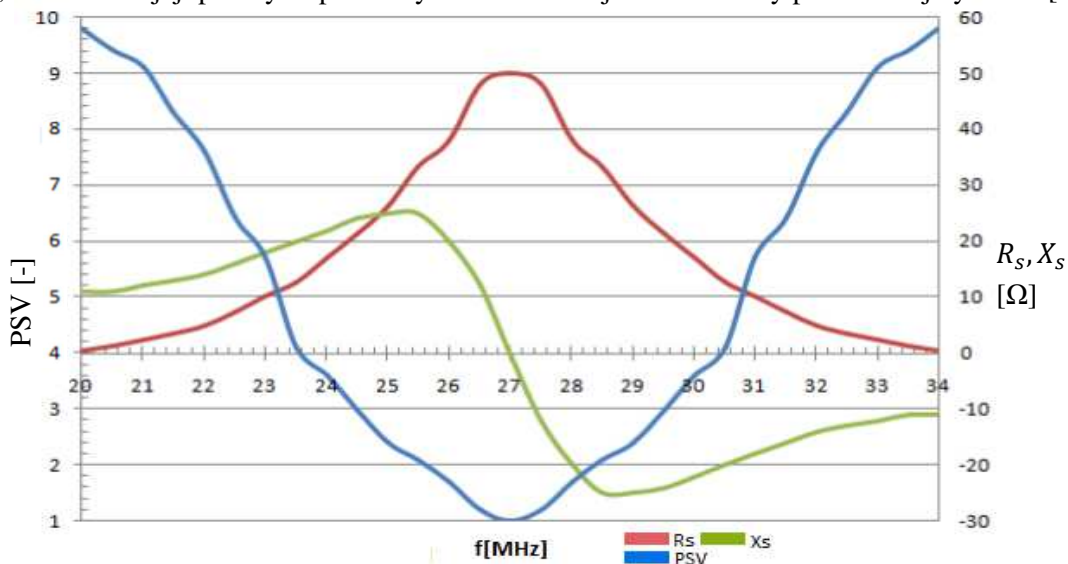
Obrázek 1.10: Zjednodušený náhradní obvod EH antény

Abychom dosáhli maximálního vyzářeného výkonu, je potřeba zavést odbočku na indukčnosti. Tím se docílí přizpůsobení impedance na 50Ω , což je důležité pro připojení koaxiálního vedení. Na obrázku (1.11) můžeme vidět obvod s odbočkou na indukčnosti.



Obrázek 1.11: Úplný náhradní obvod EH antény

Vstupní impedance - na obrázku (1.12) jsou znázorněny typické průběhy parametrů EH antény. Reálná složka vstupní impedance dosahuje na pracovní frekvenci maxima. Ale kapacitní reaktance, která je v sérii s odporem musí být vyrušena tak, aby nulové reaktance bylo dosaženo na stejné frekvenci, jako je maximální odpor. Toho je dosaženo díky připojení odbočky na ladící cívce, nastavením její polohy se prakticky dosáhne co nejmenší hodnoty poměru stojatých vln [10].



Obrázek 1.12: Typické parametry EH antény [10]

Pro představu impedance antény jako funkce kmitočtu je na obrázku (1.12) zobrazen vstupní odpor, reaktance a poměr stojatých vln, což je typické pro EH antény. Toto bylo převzato z rovnic, které definují anténu. Při měření již dokončené antény, by mělo být dosaženo podobných vlastností. Lze si také všimnout, že na rozdíl od konvenčních antén, dosahuje odpor svého vrcholu při provozní frekvenci a reaktance vstupní impedance na tomto kmitočtu prochází nulou, to platí pouze pokud je na vstupu zvolen správný kondenzátor. Kvůli měnící se hodnotě imaginární a reálné složky vstupní impedance, se také v závislosti na kmitočtu mění poměr stojatých vln. Při poměru stojatých vln 2:1 je šířka pásma rovna 62 kHz. Při poklesu o 3 dB je přibližně BW = 168 kHz, poté je hodnota činitele jakosti antény dána vztahem [10].

$$Q = \frac{f}{BW} [-; \text{Hz}, \text{Hz}] \quad (1.6)$$

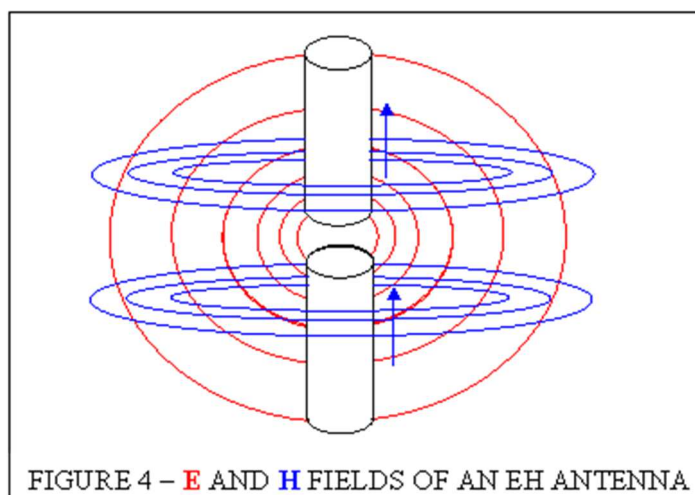
Kde:

Q - činitel jakosti

f - frekvence

BW - šířka frekvenčního pásma

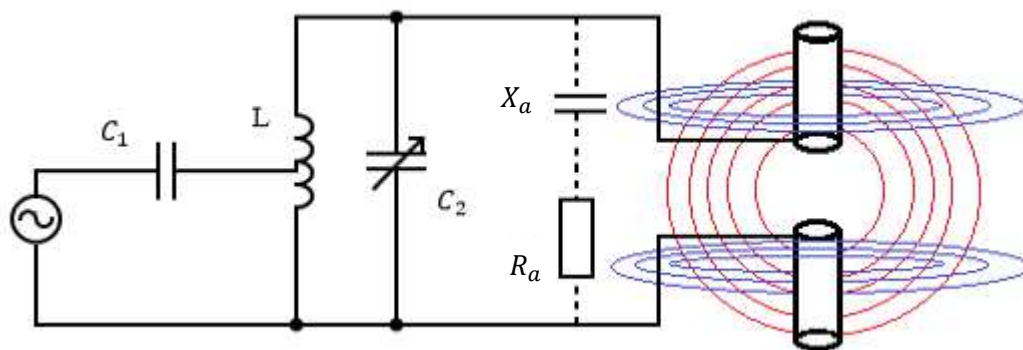
Po dosazení následujících hodnot $f = 7000 \text{ Hz}$, $Bw = 168 \text{ kHz}$ je hodnota činitele jakosti $Q = 41$. Pokud bychom zvětšili průměr antény, došlo by ke zvýšení šířky pásma. U antény v pásmu 7 MHz ($\lambda = 300/f = 300/7 \approx 42 \text{ m}$) má průměr $d \approx 60 \text{ mm}$ a délku $l = 762 \text{ mm}$. Oproti tomu konvenční půlvlnný dipól, pro stejný kmitočet dosahuje délky $l \approx 21 \text{ m}$. Účinnost antény je velmi vysoká, což je typické pro všechny EH antény. Celková délka antény je pouze 1,8 % λ ve srovnání s konvenčním půlvlnným dipólem, jehož délka je 50 % λ [10].



Obrázek 1.13: Elektrické a magnetické pole EH antény [10]

Na obrázku (1.13) je zobrazeno E a H pole, což je důležité pro lepší pochopení EH antén. Je také potřeba připomenout, že celková délka antény je přibližně 2λ . Z toho důvodu se u válců (kondenzátorů) zanedbává jejich indukčnost.

Jestliže působí mezi oběma válci vysoké napětí, dochází mezi nimi ke vzniku elektrického pole. Napětí je vysoké v napájecím bodě cylindrů, ale musí být nulové na konci cylindrů. Díky velkému napěťovému rozdílu mezi oběma konci válců, dochází k toku proudu. Proud způsobí vznik magnetického pole na těchto válcích. Nyní máme vše potřebné pro generování E a H pole, které jsou na sebe fyzicky kolmé. Obě složky musí však být v časové fázi. To je ovšem přirozené, protože pole H je vytvořeno polem E. Je také patrné, že pole E i H je omezeno průměrem stejné oblasti, jako je délka antény a neexistuje žádné reaktivní pole. To je opakem proti konvenčním anténám, které mají rozlehlé reaktanční pole, to sahá do vzdálenosti asi $1/3\lambda$ od antény, zde je pole pořád dostatečně silné, aby se spolu s odporem kombinovalo a vytvářelo tak parazitní záření. Výpočty bylo zjištěno, že u EH antén je toto parazitní záření asi o 30 dB nižší než u konvenčních antén [10].



Obrázek 1.14: Vlastní detaily EH antény

Rezonanční obvod dosahuje maximálního napětí na zátěži, kterou představuje sériová kombinace kondenzátoru a odporu ($R_a X_a$), toto napětí je přiváděno na válce. Působící napětí vytváří

elektrické pole E, kde rozdílem napětí mezi konci válců vzniká vodivý proud, ten poté vytváří magnetické pole H. Odpor záření je roven poměru intenzity elektrického pole E [V/m] a intenzity magnetického pole H [A/m]. Vztah mezi těmito poli musí odpovídat impedanci volného prostoru 377Ω .

Využití EH antény jako přijímací antény je lineární a inverzní k popsanému postupu. Přijímaný signál obsahuje elektrické i magnetické pole, který dopadá na válec, vytváří napětí na zátěži, kterou představuje sériová kombinace odporu a kondenzátoru ($R_a X_a$), z kterého nám směřuje výkon do přijímače, který je připojen k anténě. Unikátní design malé EH antény umožňuje dostatečný příjem energie, z přijímaných signálů, který převyšuje výkon zachycený běžnými anténami velkých rozměrů.

V případě, že je anténa v přítomnosti šumu, definuje se její elektrické nebo magnetické pole samostatně. V tomto případě se využívá malých anténních prvků oproti běžné anténě a z toho důvodu je generováno nepatrné vlastní šumové napětí. Jelikož jsou pole E a H nezávislá, odpor záření je prakticky nulový. Díky tomu EH anténa nabízí výrazné zvýšení poměru signál/šum, pokud je umístěna v prostoru s velkým rušením [10].

Lze snadno určit účinnost EH antény změřením šířky pásma na pracovním kmitočtu. Z definice sériového rezonančního odvodu vyplývá vztah.

$$\eta = \frac{U_L}{U_R} = \frac{U_C}{U_R} = \frac{X_L}{R_R} = \frac{X_C}{R_R} = \frac{\omega L}{R_R} = \frac{1}{\omega C R_R} = \frac{f}{BW} \quad (1.7)$$

Kde:

η - účinnost [%]

U_L - napětí na cívce [V]

U_R - napětí na ztrátovém odporu [V]

U_C - napětí na kondenzátoru [V]

X_L - reaktance ladící cívky [Ω]

R_R - odpor záření včetně ztrátového odporu [Ω]

f - pracovní frekvence [Hz]

BW - šířka pásma pro pokles o 3dB [Hz]

Ze vztahu (1.7) je možné si vyjádřit vztah pro odpor záření včetně ztrátového odporu.

$$R_R = X_L \cdot \frac{BW}{f} \quad [\Omega; \Omega, \text{Hz}, \text{Hz}] \quad (1.8)$$

Je snadné změřit BW a pracovní frekvenci f , a poté lze z rovnice (1.9) stanovit kapacitu mezi válci, kde l je délka jednoho válce a d je průměr válce zadávány v cm.

$$C = 0,215 \cdot \frac{l}{d} \cdot d + 0,807 \cdot d \quad [\text{pF}; \text{cm}, \text{cm}] \quad (1.9)$$

Pro EH antény se typicky uvádí, že poměr délky k průměru válce (l/d) a průměr válce měřeného v cm, jsou dva parametry, které řídí šířku pásma antény. I když můžeme přesně vypočítat kapacitu mezi válci, je potřeba znát také rozptylové kapacity a také hodnotu ladícího kondenzátoru, pokud je použit. Díky tomu je možné poté vypočítat indukčnost ladící cívky. Rozptylové kapacity mohou být velké i bez použití ladícího kondenzátoru. Při znalosti této hodnoty a odhadované hodnoty ztrátového odporu v ladící cívce je možné určit účinnost. Účinnost je prostý podíl vyzařovaného výkonu a příkonu. Rozdíl mezi příkonem a vyzářeným výkonem je v množství tepla vzniklého v ladící cívce. Účinnost je obvykle vyjádřena tímto vztahem:

$$\eta = \frac{R_R}{R_R + R_L} \cdot 100 \quad [\%; \Omega, \Omega] \quad (1.10)$$

Kde:

R_R je odpor záření a R_L je ztrátový odpor. Avšak změřenou hodnotou je $R_M = (R_R + R_L)$, potom je vztah pro účinnost:

$$\eta = \frac{R_M - R_L}{R_M} \cdot 100 \quad [\%; \Omega, \Omega] \quad (1.11)$$

kde R_M je naměřená hodnota odporu, která zahrnuje jak odpor záření, tak i ztrátový odpor. Typická účinnost u EH antén bývá vyšší než 95 %. Například pokud je naměřený odpor $R_M = 86 \Omega$ a ztrátový odpor $R_L = 2 \Omega$, poté při dosazení do vztahu (1.11) je výsledná účinnost $\eta \approx 97,7 \%$, to odpovídá snížení výkonnosti o -0,1 dB. U EH antén jsou tedy pouze jediné ztráty, a to na ladící cívce. Ztráty lze odhadnout za předpokladu, že máme cívky se známým Q , indukčností L a pracovním kmitočtem f dané ztrátovým odporem podle vztahu [10].

$$R_L = \frac{X_L}{Q} \quad [\Omega; \Omega, -] \quad (1.12)$$

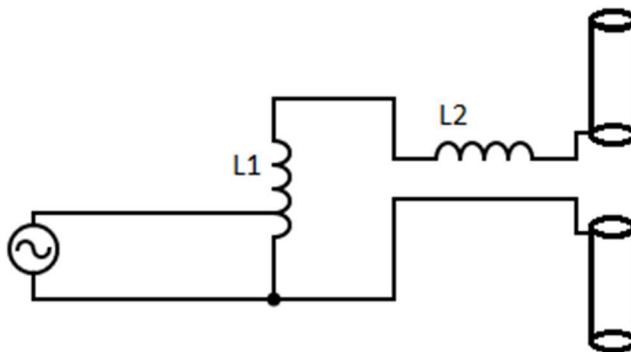
Kde:

R_L - ztrátový odpor

X_L - induktivní reaktance

Q - činitel jakosti

Rozptylová kapacita je tvořená ze dvou zdrojů. Hlavním z nich je vlastní kapacita ladící cívky, druhým zdrojem je kapacita mezi anténou a zemí, kde zemí může být stínění koaxiálního kabelu nebo věž, na které je anténa připevněna nebo jiný objekt v blízkém okolí antény.



Obrázek 1.15: Kompletní schéma EH antény Star

1.5 Popis matematického aparátu

V této podkapitole jsou popsány matematické výpočty nezbytné pro stanovení rozměrů EH antény, použité pro vytvoření modelu. Některé z uvedených vzorců, jsou pouze teoretické a při praktické konstrukci antény, se mohou hodnoty lišit. Důvodem je zanedbání některých jevů při výpočtech.

Jelikož u navrhovaného modelu slouží jako anténa 2 cylindry, je nutné vypočítat jejich rozměry pro danou frekvenci. Výpočty lze vidět na vzorci (1.13), pro výpočet průměru válce. Kde hodnota 2,54 cm odpovídá průměru válce na 1 metr vlnové délky. Vztah (1.14) slouží, pro výpočet délky cylindru. Parametry použité pro výpočet jsou zobrazeny na obrázku (1.16).

$$d = \lambda \cdot 2,54 \quad [\text{cm}; \text{m}] \quad (1.13)$$

Kde:

d - průměr cylindru

λ - vlnová délka odpovídající zvolené frekvenci

$$l = d \cdot \pi \quad [\text{cm}; \text{cm}] \quad (1.14)$$

Kde:

l - délka cylindru

d - průměr cylindru



Obrázek 1.16: Cylindrový zářič s kótami

Nyní již jsou popsány vzorce pro výpočet délky a průměru válcového zářiče. V případě zářiče jiného tvaru, je volen stejný rozměr délky zářiče l a šířka zářiče jako obvod o průměru d . Nyní je ještě nutné stanovit tloušťku zářiče. V případě vysokých frekvencí se ve vodičích proud vede v tenké vrstvě blízko povrchu vodiče, tento efekt je pojmenován jako povrchový jev (skinefekt), vztah (1.15) popisuje výpočet pro stanovení minimální tloušťky zářiče [11].

$$d_s = \sqrt{\frac{\rho}{f\pi\mu}} \quad (1.15)$$

Kde:

d_s - tloušťka materiálu zářiče [mm]

ρ - měrná rezistivita materiálu [$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$]

f - frekvence [kHz]

μ - magnetická permeabilita [$\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$]

Jak bylo zmíněno, funkci antény zastávají 2 cylindry, u popsaného typu EH antény se vzdálenost mezi cylindry rovná průměru cylindru. Již máme vypočítány rozměry cylindrů. Nyní následuje výpočet minimálních celkových rozměrů antény. Výpočtu odpovídá vzorec (1.16).

$$l_{celková} = d + 2 \cdot d \cdot l/d \quad [\text{cm; cm, cm}] \quad (1.16)$$

Kde:

$l_{celková}$ - celková délka antény

l - délka cylindrů

d - průměr cylindrů

l/d - poměr délky a průměru cylindrů

Pro naladění antény na požadovaný rezonanční kmitočet, slouží rezonanční obvod LC . K výpočtu je použit Thomsonův vztah pro sériový rezonanční obvod LC .

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{LC}} \quad [\text{Hz; H, F}] \quad (1.17)$$

Kde:

f_0 - rezonanční frekvence

L - indukčnost

C - kapacita

Pro výpočet cívky je použit vzorec (1.18) [12]. Hodnoty činitele k , jsou uvedeny v příloze.

$$L = N^2 \cdot d_L \cdot k \quad [\text{H; -, cm, -}] \quad (1.18)$$

Kde:

L - indukčnost cívky

N - počet závitů cívky

d_L - průměr cívky podle průměru nosné novodurové trubky

k - činitel poměru délky a průměru cívky

Ze vztahu (1.17), je poté možné odvodit vztah pro výpočet hodnoty kondenzátoru C .

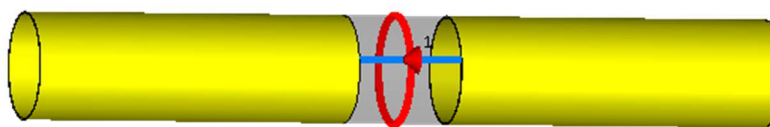
$$C = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot f_t^2 \cdot L} \quad [\text{F; Hz, H}] \quad (1.19)$$

2 Návrh antény v CST Microwave studio

Tato kapitola se zabývá návrhem elektricky krátké antény v programu CST Microwave studio. Tento program je navržen pro simulace různých anténních systémů a mnoho dalších zařízení. V této práci, není věnována samotná kapitola pro popis funkce a možností tohoto programu, to je možné nalézt na webových stránkách CST [13]. Prvním bodem kapitoly je popis postupu vytváření modelu, kdy je přesně popsáno, jaké se volily rozměry zářičů. Dále také zvolené hodnoty prvků přizpůsobovacího obvodu. Druhý bod kapitoly je věnován zkoumání vlivu změn rozměrů a konfigurace na parametry antény. Poslední bod kapitoly je věnován optimalizaci navrženého modelu vzhledem k požadovaným parametrům.

2.1 Návrh tvaru zářiče pro EH anténu

EH anténa se skládá ze dvou hlavních částí, první je přizpůsobovací člen. Tím je myšlen elektronický obvod, který zajišťuje impedanční přizpůsobení, nastavení požadované rezonanční frekvence. Druhou částí EH antény je zářič. V prvním případě jsou jako zářiče použity 2 válce.



Obrázek 2.1: model válcového zářiče

Podle zadání, má zkonstruovaná anténa pracovat na frekvenci 27,2 MHz. Podle toho jsou zvoleny rozměry zářičů antény, tyto rozměry vychází z tabulky (2.1).

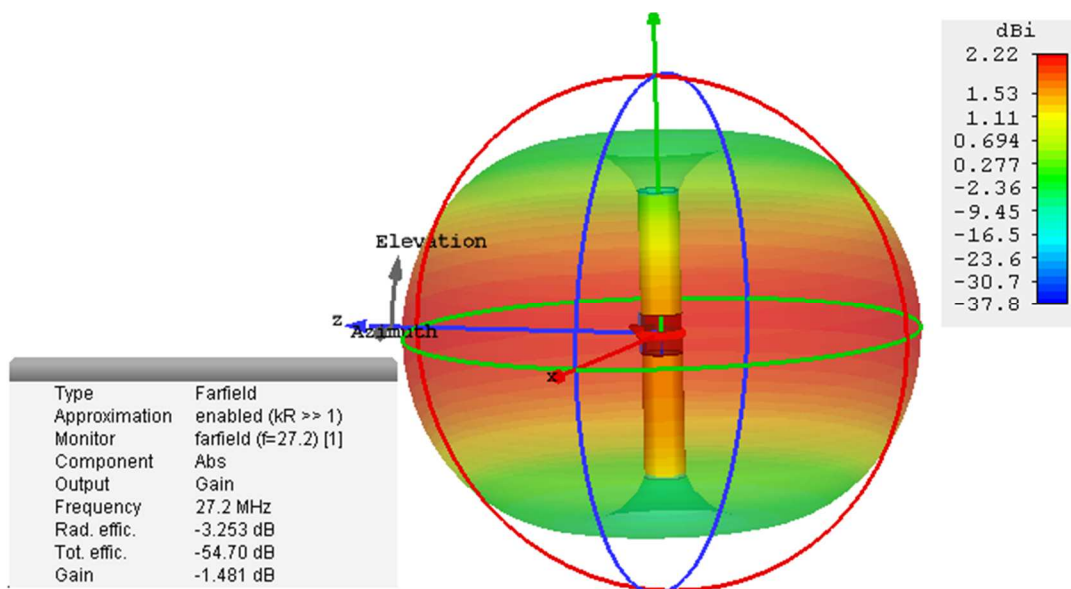
Tabulka 2.1: Rozměry zářičů EH antény podle Teda Harta [14]

| Frekvence [MHz] | Vlnová délka [m] | Průměr válce [mm] | Výška cylindrů [mm] | 2:1 PSV šířka pásma [kHz] | Kapacita [pF] |
|-----------------|------------------|-------------------|---------------------|---------------------------|---------------|
| 3,5 | 80 | 203,2 | 637,5 | 70 | 126 |
| 7 | 40 | 101,6 | 320 | 140 | 63 |
| 14 | 20 | 50,8 | 160 | 280 | 32 |
| 28 | 10 | 25,4 | 78,7 | 560 | 16 |

Z tabulky je patrné, že pro frekvenci 28 MHz je průměr válce 25,4 mm, to odpovídá vlnové délce 10 m. Pro frekvenci 27,2 MHz odpovídá vlnová délka 10-12 m, volíme tedy střed 11 m. Z výpočtu $2.54 \cdot 11$ se získá průměr válce 28 mm. Následuje výpočet délky cylindrů pomocí vzorce (1.14). Podle tohoto vzorce je hodnota délky jednoho cylindru 88 mm. Mezera mezi válci se volí v poměru $\frac{1}{3}$ nebo $\frac{1}{4}$ délky zářiče. Posledním parametrem, který je nutno spočítat je minimální tloušťka zářiče, k tomu je použit vztah (1.13). Materiál použitý pro zářiče je měď parametry nutné pro výpočet tohoto typu materiálu jsou následovné $\rho = 17,241 \Omega mm^2/km$, $\mu = 1$.

$$\sqrt{\frac{\rho}{f\pi\mu}} = \sqrt{\frac{17,241}{27,2 \cdot 10^3 \cdot \pi \cdot 1}} = 0,025 \Rightarrow 25 \mu\text{m}$$

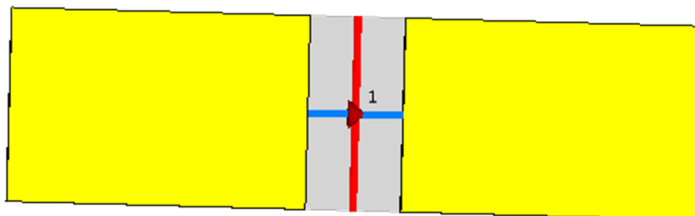
Tyto hodnoty jsou pouze teoretické. Při praktických realizacích jsou rozměry válcového zářiče větší, aby byla délka zářiče alespoň $0,02 \lambda$. Proto jsou v prvotním návrhu zářiče použity následující hodnoty rozměrů $l = 100 \text{ mm}$, průměr $d = 32 \text{ mm}$ a tloušťka plechu $0,55 \text{ mm}$. Na obrázku (2.2) je možné vidět vyzařovací charakteristiku válcového zářiče s výše uvedenými rozměry.



Obrázek 2.2: vyzařovací charakteristika cylindrového zářiče

$$\eta [\text{dB}] = 10 \cdot \log \eta [-] \Rightarrow \eta [-] = 10^{\frac{\eta [\text{dB}]}{10}} \quad (2.1)$$

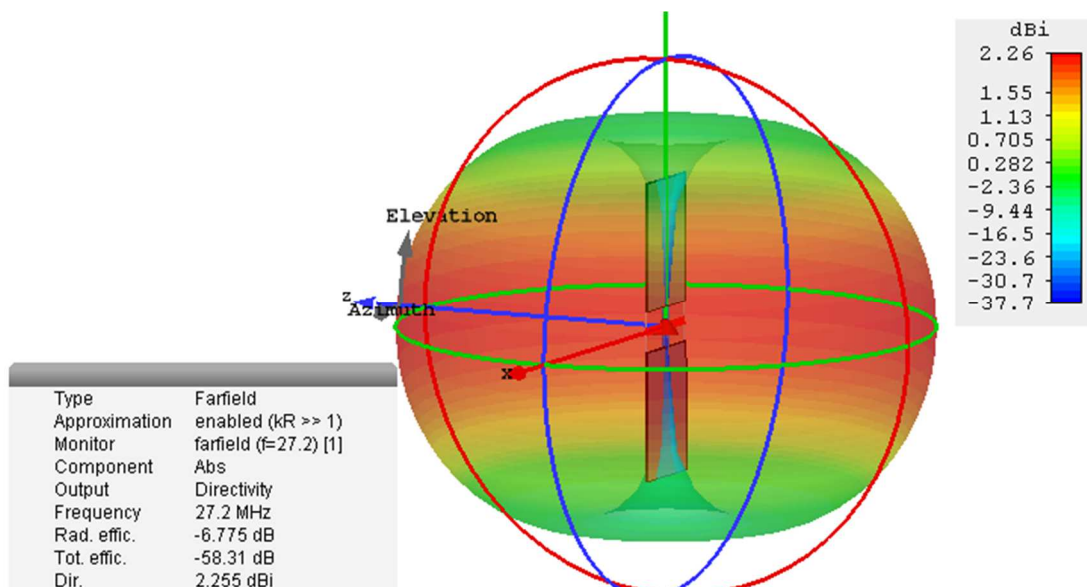
Tato vyzařovací charakteristika odpovídá zářiči bez přizpůsobení na frekvenci 27.2 MHz. Bez tohoto přizpůsobení daný zářič o velikosti zlomku délky vlny ($0,02 \lambda$) rezonuje ve vyšší frekvenční oblasti. Účinnost vyzařování na sledované frekvenci je -3.253 dB, po dosazení do vztahu (2.1) získáme hodnotu 47.3 %. Z charakteristiky vyplývá, že zářič vyzařuje hlavně ve směru osy X, to odpovídá teoretickým předpokladům. Přizpůsobení antény na požadovanou frekvenci je řešeno v další kapitole práce zařazením pasivního členu.



Obrázek 2.3: model obdelníkového zářiče

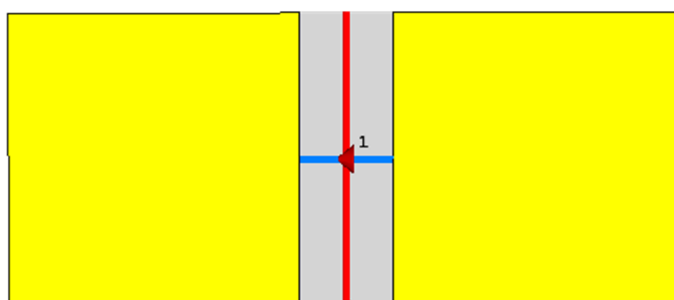
Standardizované rozměry jsou vytvořeny pro válcové zářiče. Jiné typy zářičů takové standardy nemají. Proto jsou rozměry tohoto zářiče zvoleny. Délka zářiče byla navržena tak aby byla alespoň 2 % z vlnové

délky, tedy 100 mm, šířka odpovídá přibližně $\frac{2}{3}$ délky zářiče 65 mm, mezera je zvolena přibližně jako $\frac{1}{3}$ délky zářiče a to 32 mm.



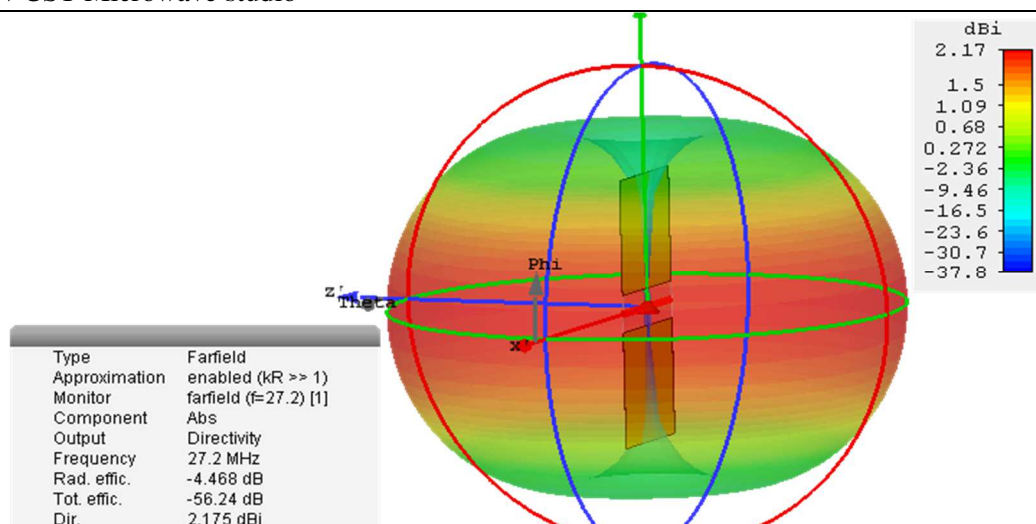
Obrázek 2.4: vyzařovací charakteristika obdelníkového zářiče

Vyzařovací charakteristika obdelníkového zářiče vykazuje nejnižší účinnost vyzařování ze všech popisovaných typů zářičů -6,775 dB, což je hodnota přesahující 21 %. Avšak také u tohoto zářiče není použit přizpůsobovací člen pro frekvenci 27,2 MHz, to znamená, že zářič rezonuje na mnohem vyšší frekvenci. Z charakteristiky lze vidět, že popisovaný zářič vyzařuje ve stejném směru jako předchozí typ, a to ve směru osy X.



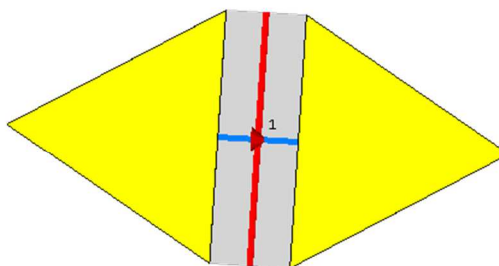
Obrázek 2.5: model čtvercového zářiče

Také k tomuto typu zářiče není vytvořen standard, který by určoval rozměry. Proto jsou rozměry opět zvoleny tak, aby jejich délka byla alespoň 0.02λ z délky vlny. Tudíž zvolená délka jedné strany je 100 mm, to odpovídá uvedenému poměru na frekvenci 27.2 MHz. Mezera mezi zářiči je 32 mm.



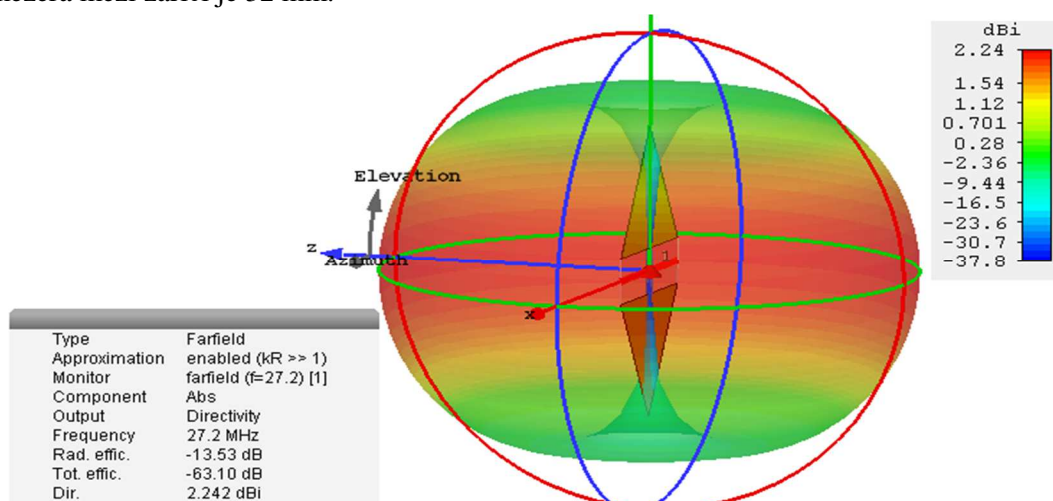
Obrázek 2.6: vyzařovací charakteristika čtvercového zářiče

U čtvercového zářiče je účinnost vyzařovací charakteristiky nepatrně vyšší než u předchozího obdélníkového. Ale také zde je velice nízká -4,468 dB což je po dosazení do vztahu (2.1) hodnota větší než 35 %, důvod je totožný s předchozími, a to rezonance zářiče na podstatně vyšším kmitočtu. Směr vyzařování je totožný s předchozími typy, ve směru osy X.



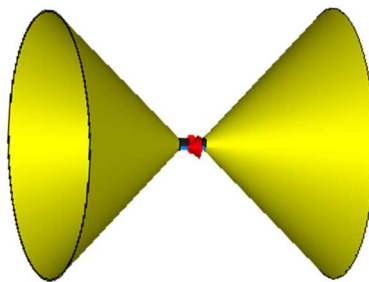
Obrázek 2.7: model trojúhelníkového zářiče

U všech navržených typů zářiče jsou použity téměř totožné parametry. V tomto případě se jedná o rovnostranný trojúhelník, kde délka strany je 100 mm což odpovídá opět 0,02 λ délky vlny na kmitočtu 27.2 MHz a mezera mezi zářiči je 32 mm.



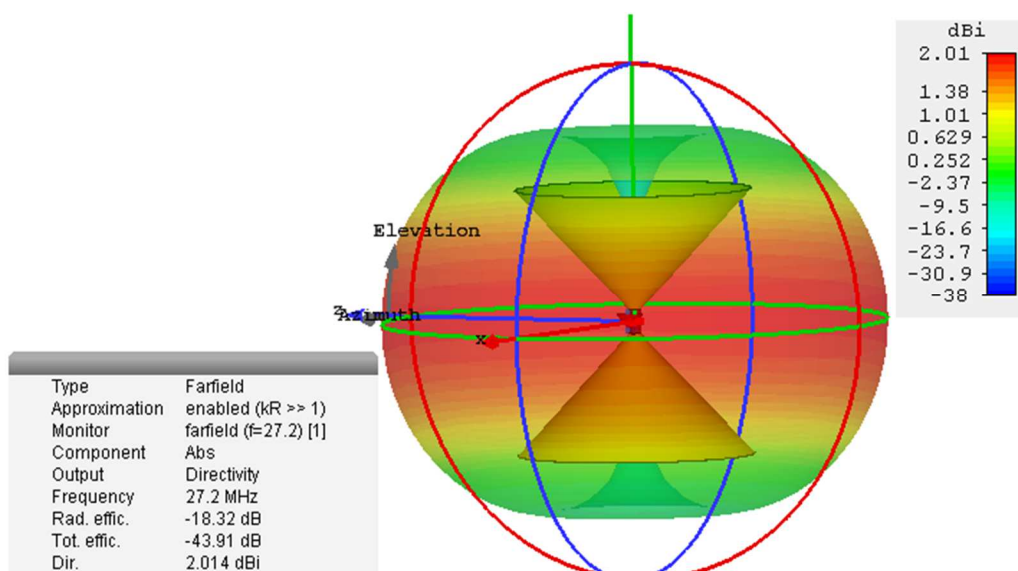
Obrázek 2.8: vyzařovací charakteristika trojúhelníkového zářiče

Na obrázku (2.8) lze vidět vyzařovací charakteristiku trojúhelníkového zářiče. U tohoto modelu je vyzařovací účinnost druhá nejnižší z uváděných modelů zářičů a to -13,53 dB, která odpovídá hodnotě 4,4 %.



Obrázek 2.9: model kuželovitého zářiče (Bi-cone)

Posledním uváděným typem zářiče je kužel. Rozměry byly i u tohoto typu voleny jako zlomek délky vlny $0,02 \lambda$. Délka jednoho kuželu je 100 mm a průměr širší strany je také 100 mm, napájení je umístěno do vyústění kuželů ve středu o průměru 5 mm. Rozměry mezery mezi kužely jsou 20 mm.



Obrázek 2.10: vyzařovací charakteristika kuželovitého zářiče

U posledního typu zářiče dosahuje vyzařovací účinnost nejhorší hodnoty -18.32 dB. Při přepočtu hodnoty na procenta, získáme hodnotu přesahující pouze 1 %. Směr vyzařování je totožný s cylindrovým zářičem, a to ve směru osy X. Po zobrazení vyzařovacích charakteristik všech modelů zářičů, lze konstatovat, že žádný z uvedených typů nedosahuje výborné účinnosti vyzařování na kmitočtu 27,2 MHz, ale nejlepší hodnoty je dosaženo s použitím zářiče ve tvaru cylindru, z toho důvodu je tento zářič vybrán pro reálnou konstrukci. V tabulce (2.2) jsou vypsány jednotlivé hodnoty imaginární části impedance zářiče. Reálná hodnota není uvedena, jelikož hodnoty neodpovídají skutečnosti. Z důvodu, kdy anténa potřebuje poskytnout fázový posun 90° , ale tento program umí pracovat pouze s konvenčními typy antén, které mají tento fázový posun roven 180° .

Tabulka 2.2: Hodnoty reaktancí jednotlivých zářičů

| Tvar zářiče | $X_a [\Omega]$ | Srovnání oproti cylindru [%] |
|-------------|----------------|------------------------------|
| Cylindr | -2323,521 | 0 |
| Trojúhelník | -2521,453 | -8,5 |
| Obdelník | -4716,109 | -102,1 |
| Čtverec | -3712,851 | -59,8 |
| Kužel | -846,640 | 63,6 |

Z tabulky lze vyčíst, že všechny zářiče mají imaginární část impedance kapacitního charakteru. Nejlepší výsledek je u zářiče tvaru kužel, avšak tento typ je těžké prakticky realizovat. Z toho důvodu a také z důvodu lepších výsledků u vyzářovací charakteristiky. Je pro další analýzu a praktickou realizaci použit tvar s druhým nejlepším výsledkem cylindr. Této tabulce je věnována větší pozornost v další kapitole, která se věnuje návrhu přizpůsobovacího obvodu.

2.2 Návrh přizpůsobovacího obvodu EH antény

Tato kapitola je věnována návrhu přizpůsobovacího obvodu antény. Tento obvod se stará o impedance přizpůsobení a nastavení antény na požadovanou rezonanční frekvenci. Z výše uvedených důvodů, kdy program nepracuje s potřebným fázovým posunem o 90° , nemůže být použit přímo navržený model antény připojený k přizpůsobovacímu obvodu. Namísto antény je použit náhradní obvod antény. Ten se skládá z kondenzátoru představující kapacitní reaktanci a odporu, který představuje činný odpor. Reaktance odpovídá zjištěné hodnotě ze simulací v programu CST, jako činný odpor byla použita teoretická hodnota. Jako první jsou použity jednoduché obvody, jako L nebo T člunek. Poté jsou použity ověřené modely obvodů pro EH antény.

2.2.1 Přizpůsobovací obvod typu L

Prvním uvedeným typem je nejjednodušší rezonanční obvod, a to L člunek. Nejprve jsou uvedeny vztahy, které vedou k výpočtu prvků obsažených v obvodu. Člunek typu L, obsahuje cívku (L_1) zapojenou do série s anténou a poté paralelně zapojený kondenzátor C_1 [15].

$$Q = \sqrt{\frac{R_p}{R_a} - 1} \quad [-; \Omega, \Omega] \quad (2.2)$$

Kde:

Q - pomocná bezrozměrná hodnota

R_p - charakteristická impedance napáječe

R_a - rezistance antény

$$X_{L1} = R_p \cdot Q + |X_a| \quad [\Omega; \Omega, -, \Omega] \quad (2.3)$$

Kde:

X_{L1} - reaktance sériové cívky L_1

R_p - charakteristická impedance napáječe

Q - pomocná bezrozměrná hodnota

X_a - reaktance antény

$$X_{C1} = \frac{R_p}{Q} \quad [\Omega; \Omega, -] \quad (2.4)$$

Kde:

X_{C1} - reaktance paralelního kondenzátoru C_1

R_p - charakteristická impedance napáječe

Q - bezrozměrná pomocná hodnota

Pomocí výše popsaných vzorců, jsou známy hodnoty reaktance sériové cívky a paralelního kondenzátoru, nyní stačí tyto hodnoty použít do vztahu (2.5), (2.6) a tím se získají hodnoty L_1, C_1 .

$$C_1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_{C1}} \quad [F; Hz, \Omega] \quad (2.5)$$

Kde:

C_1 - kapacita kondenzátoru

f - pracovní kmitočet

X_{C1} - reaktance paralelního kondenzátoru C_1

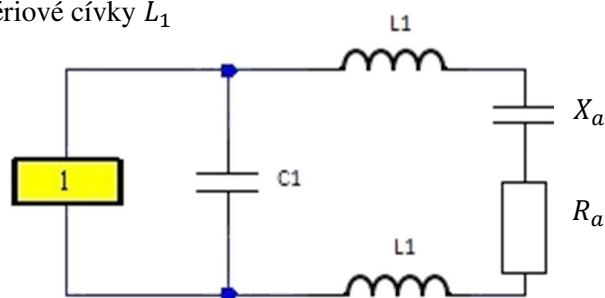
$$L_1 = \frac{X_{L1}}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad [H; \Omega, Hz] \quad (2.6)$$

Kde:

L_1 - indukčnost cívky

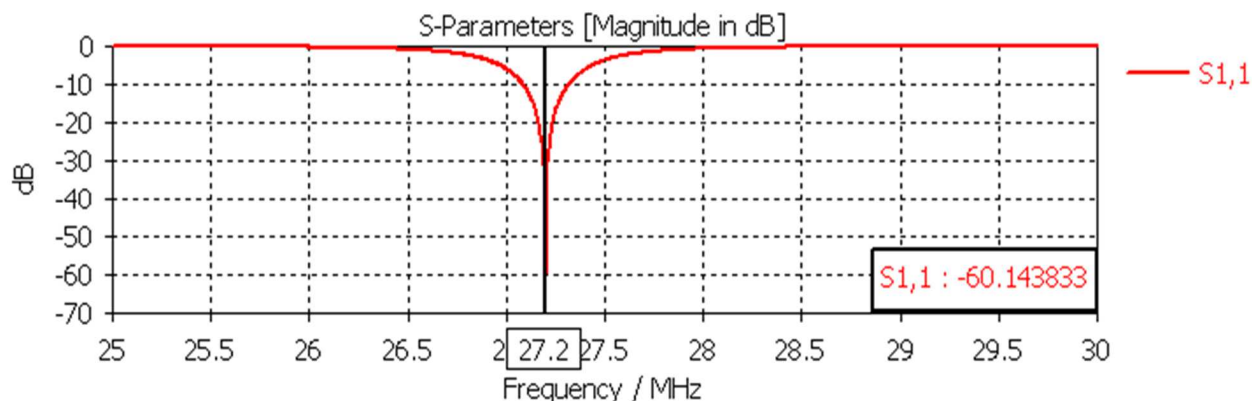
f - pracovní kmitočet

X_{L1} - reaktance sériové cívky L_1



Obrázek 2.11: L článek v programu CST

U zapojení rezonančního obvodu typu L je cívka zapojena do série s anténou, to je z důvodu kompenzace vysoké hodnoty reaktance antény, která je kapacitního charakteru. Z důvodu symetrizace obvodu, je cívka rozdělena do dvou větví. Obvod na obrázku (2.11), slouží k přizpůsobení antény jejichž činný odpor je menší než impedance přijímače (50 Ω), v opačném případě by byl použit gama článek.



Obrázek 2.12: Parametr S11 pro L článek při frekvenci 27.2 MHz

Na obrázku (2.12), je zobrazena charakteristika parametru S11 pro rezonanční článek typu L. Při požadované rezonanční frekvenci 27.2 MHz bylo dosaženo hodnoty menší než -60 dB. Šířka pásma se změří při poklesu parametru S11 na hodnotu -10 dB, na této hodnotě je šířka pásma rovna 233 kHz. To odpovídá činiteli jakosti $Q = 116,738$.

2.2.2 Přizpůsobovací obvod typu T

Dalším uvedeným rezonančním obvodem, je článek typu T. Název je podle prvků, jenž obvod tvoří a připomíná písmeno T. V případě navrženého zářiče je ve článku použit kondenzátor C_1 a dvě cívky L_1, L_2 . Důvodem je reaktance antény, která je kapacitního charakteru. Před nastavením samotné simulace, je potřeba vypočítat hodnoty prvků obsažených v obvodu [15].

$$X_{L1} = R_a \cdot Q + |X_a| \quad [\Omega; \Omega, -, \Omega] \quad (2.7)$$

Kde:

X_{L1} - reaktance cívky L_1

R_a - rezistance antény

Q - zadaný činitel jakosti

X_a - reaktance antény

$$X_{L2} = R_p \cdot \sqrt{\frac{R_a}{R_p} \cdot (Q^2 + 1) - 1} \quad [\Omega; \Omega, \Omega, -] \quad (2.8)$$

Kde:

X_{L2} - reaktance cívky L_2

R_p - charakteristická impedance napáječe

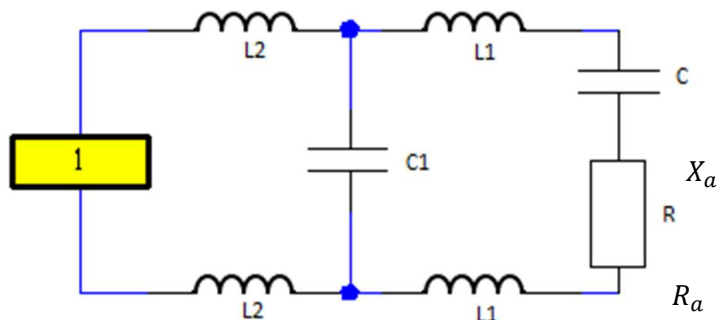
$$X_{C1} = \frac{R_a \cdot (Q^2 + 1)}{Q + \sqrt{\frac{R_a}{R_p} \cdot (Q^2 + 1) - 1}} \quad [\Omega; \Omega, -, \Omega]$$

(2.9)

Kde:

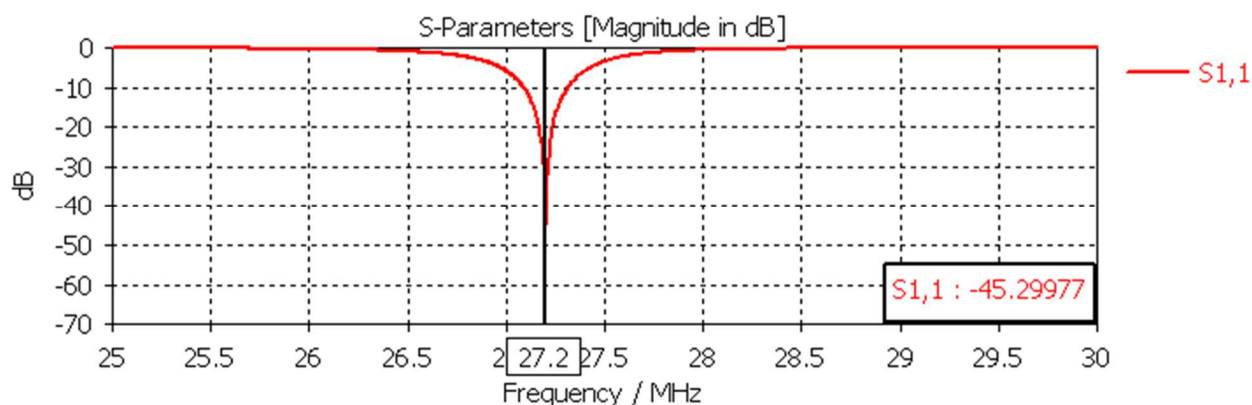
X_{C1} - reaktance kondenzátoru C_1

Po zjištění hodnot jednotlivých reaktancí komponentů obsažených v T článku, následuje výpočet kapacity a indukčností podle vztahů (2.5), (2.6). Na obrázku (2.13) je zobrazeno schéma T článku vytvořené v programu CST.



Obrázek 2.13: T článek v programu CST

Obrázek (2.13) ukazuje zapojení T článku, kde jsou v sérii zapojeny cívky a mezi ně je připojen paralelně kondenzátor. Důvod tohoto zapojení je kapacitní charakter reaktance antény. V případě induktivního charakteru, by v sérii byly zapojeny dva kondenzátory a mezi ně paralelně cívka. Opět je zde zajištěna symetrie rozdělením cívek do obou větví. Rezonanční článek T, je použit z důvodu hodnoty činného odporu antény, který je nižší než činný odpor přijímače.



Obrázek 2.14: Parametru S11 pro T článek při frekvenci 27.2 MHz

Na obrázku (2.14) lze vidět charakteristiku parametru S11 pro rezonanční obvod typu T. Při frekvenci 27.2 MHz je dosaženo hodnoty nižší než -45 dB parametru S11. Při poklesu parametru na hodnotu -10 dB, je šířka pásma rovna 218 kHz, činitel jakosti obvodu Q je 124,771.

2.2.3 Přizpůsobovací obvod L+T

Je jedním z obvodů, které uvedl Ted Hart, obvod je také uveden v teoretické části práce. Obvod obsahuje podle názvu dva články L a T. Indukčnost obsažená v T článku, která je v sérii s anténou slouží ke kompenzaci kapacitní reaktance antény, další část obvodu slouží k přizpůsobení na požadovanou frekvenci. Oba články také zajišťují potřebný fázový posun o 90 °. Oproti obvodu uvedenému v teoretické části obrázek (1.4), se obvod zjednodušil sloučením indukčností L_1, L_2 . Před výpočty prvků v obvodu je nejprve nutné zjistit hodnoty reálné a imaginární části impedance antény pro požadovanou frekvenci. Tyto hodnoty lze získat pomocí vytvořeného modelu zářiče v simulačním programu nebo konstrukcí reálné antény a jejich následným změřením. Po zjištění těchto hodnot stačí použít vztah (2.10), tím se získá hodnota indukčnosti pro kompenzaci reaktance antény [8].

$$L = \frac{X_a}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad [H; \Omega, Hz] \quad (2.10)$$

Kde:

L - hodnota kompenzační cívky

X_a - reaktance antény

f - rezonanční frekvence

Pro zajištění symetrie antény, se tato hodnota rozdělí mezi 2 cívky. Po vykompenzování reaktance zbývá vypočítat zbylé prvky obvodu, na které se uplatní vzorce pro výpočet Π článku [15]. Pro zajištění symetrie antény, se i hodnota cívky obsažené v Π článku rozdělí do dvou. Schéma vytvořené v programu CST lze vidět na obrázku (2.15).

$$R_v = \frac{R_a^2 + X_a^2}{R_a} \quad [\Omega; \Omega, \Omega] \quad (2.11)$$

$$X_v = \frac{R_a^2 + X_a^2}{X_a} \quad [\Omega; \Omega, \Omega] \quad (2.12)$$

Kde:

R_v - rezistance antény při paralelním zapojení

R_a - rezistance antény v sériovém zapojení

X_a - reaktance antény v sériovém zapojení

X_v - reaktance antény při paralelním zapojení

$$X_{C1} = \frac{R_v}{Q} \quad [\Omega; \Omega, -] \quad (2.13)$$

Kde:

X_{C1} - celková reaktance antény

Q - činitel jakosti, volí se v rozmezí 5 až 20

$$X_{C2} = R_p \cdot \sqrt{\frac{\frac{R_v}{R_p}}{Q^2 + 1 - \frac{R_v}{R_p}}} \quad [\Omega; \Omega, \Omega, -] \quad (2.14)$$

Kde:

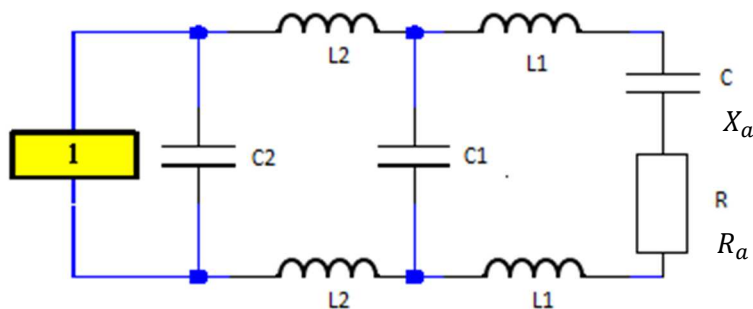
X_{C2} - reaktance kondenzátoru C_2

R_p - charakteristická impedance napáječe

$$X_{L1} = \frac{Q \cdot R_p + \frac{R_p \cdot R_p}{X_{C2}}}{Q^2 + 1} \quad [\Omega; -, \Omega, \Omega, \Omega] \quad (2.15)$$

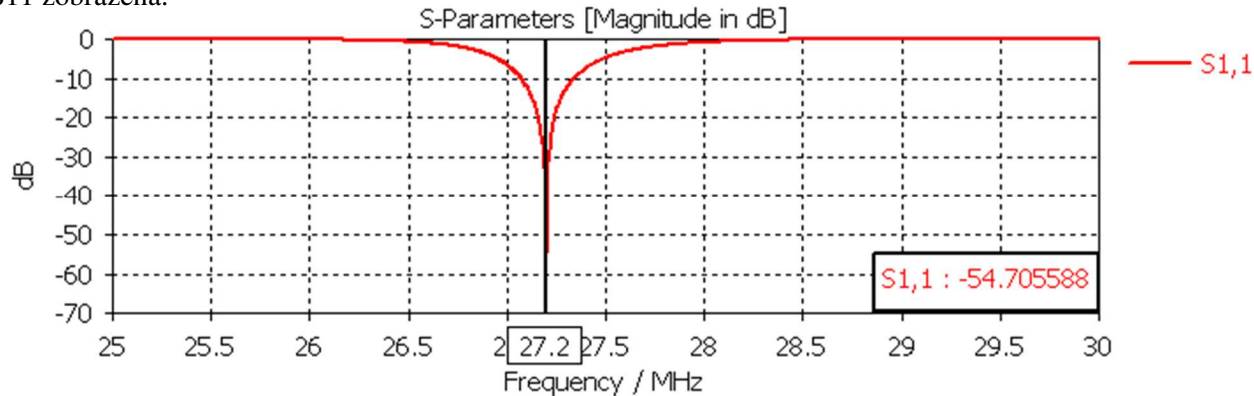
Kde:

X_{L1} - reaktance cívky L_1



Obrázek 2.15: L+T člunek v programu CST

Po zadání vypočítaných hodnot, je třeba doladit obvod pomocí ladících kondenzátorů na minimální hodnotu parametru S11. Na obrázku (2.16) je tato charakteristika po vyladění parametru S11 zobrazena.

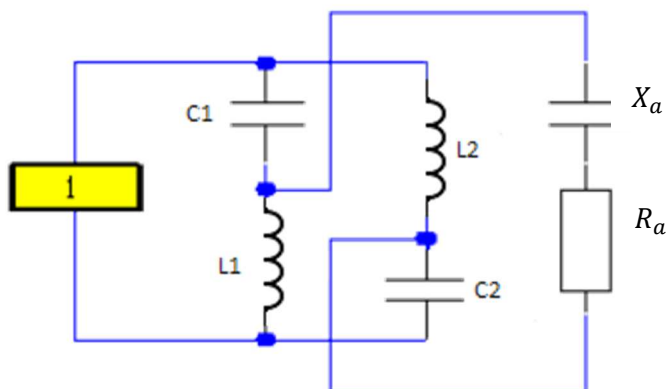


Obrázek 2.16: parametr S11 pro L+T člunek při frekvenci 27.2 MHz

Z charakteristiky lze vyčíst hodnotu parametru S11, která je téměř -55 dB. Hodnota šířky pásma při poklesu parametru S11 na -10 dB je 259 kHz, činitel jakosti u tohoto obvodu je 105,019.

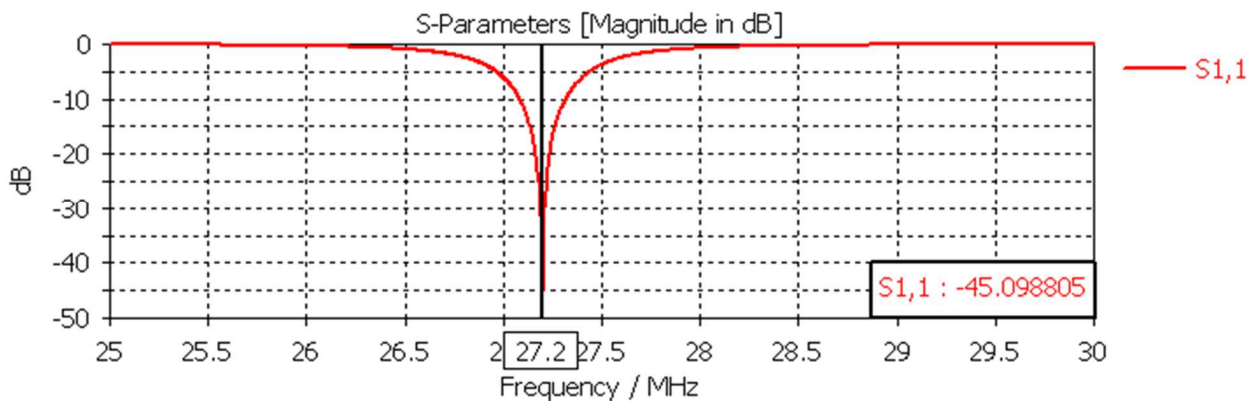
2.2.4 Přizpůsobovací obvod EH 6 generace

Dalším uvedeným přizpůsobovacím obvodem, který je patentem Teda Harta je antiparalelní zapojení dvou sériových rezonančních členů LC. Toto zapojení je často používáno pro přizpůsobení EH antény. Hlavní výhodou tohoto zapojení je přivedení velkého napětí na svorky antény, což je důležité pro použití jako vysílací antény. Pro tento typ obvodu nejsou uvedeny konkrétní výpočty jednotlivých prvků. Velikosti cívek pro jednotlivé frekvence jsou dané a o přesné doladění antény se stará dvojice kapacitních trimrů. Schéma obvodu je zobrazeno na obrázku (2.17) [8].



Obrázek 2.17: obvod 6. generace v programu CST

Na obrázku (2.17) je zobrazeno schéma obvodu 6. generace v programu CST. Z důvodů, které jsou výše zmíněné, tedy nedostupného matematického aparátu pro výpočty jednotlivých prvků, jsou hodnoty nastaveny experimentálně pro nastavení rezonance na požadované frekvenci.

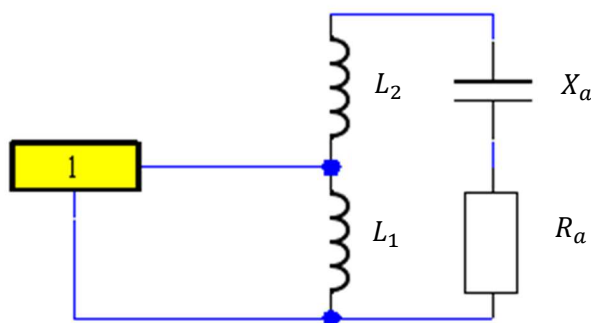


Obrázek 2.18: parametr S_{11} obvodu 6. generace při frekvenci 27.2 MHz

Po doladění prvků antény na rezonanční frekvenci, se podařilo dosáhnout hodnoty parametru S_{11} nižší než -45 dB. Hodnota šířky pásma při poklesu na hodnotu -10 dB je 201 kHz což odpovídá činiteli jakosti $Q = 135.323$. Tato hodnota šířky pásma je nejnižší ze simulovaných obvodů, to může být způsobeno právě experimentálním nastavením hodnot.

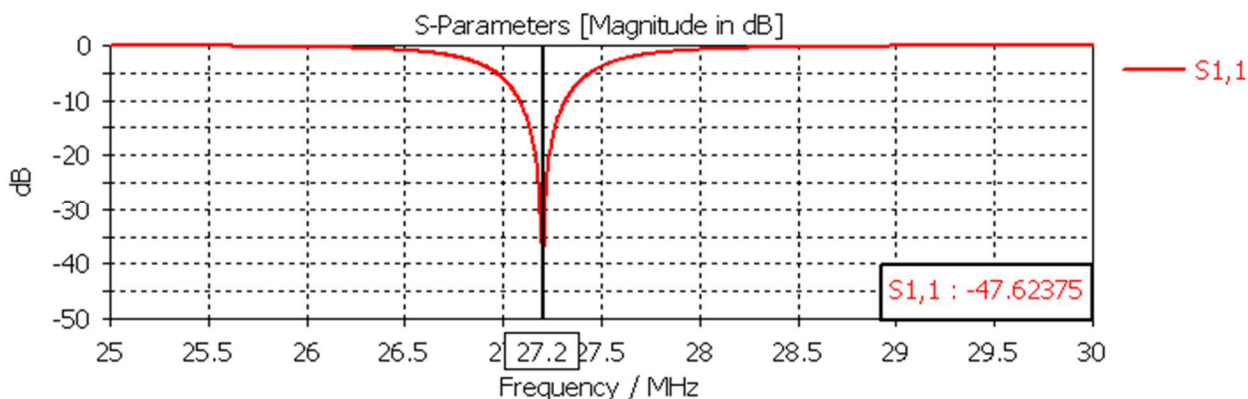
2.2.5 Přizpůsobovací obvod STAR

Posledním uvedeným přizpůsobovacím obvodem je obvod STAR. Tento typ je používán pro svou jednoduchou stavbu, jelikož obsahuje pouze indukčnosti bez nutnosti použití kondenzátoru [8].



Obrázek 2.19: obvod STAR v programu CST

Na obrázku (2.19) lze vidět schéma obvodu STAR, v reálném zapojení jsou cívky L_1, L_2 realizovány jako jedna cívka s odbočkou pro zajištění impedančního přizpůsobení. Je možné na odbočce vytvořit další cívku, která v případě vysílací antény slouží jako cívka zdrojová. V případě přijímací cívky jako vazební cívka. Tuto cívku není nezbytně nutné realizovat.



Obrázek 2.20: parametr S_{11} obvodu STAR pro frekvenci 27.2 MHz

Z charakteristiky na obrázku (2.20) je patrné, že hodnota parametru S_{11} je na rezonančním kmitočtu 27.2 MHz rovna hodnotě nižší než -47 dB. Při poklesu parametru na hodnotu -10 dB, je hodnota šířky pásma 239 kHz, činitel jakosti obvodu $Q = 113,808$. V tabulce (2.3) jsou vypsány parametry všech analyzovaných přizpůsobovacích obvodů s dopočítanou hodnotou činitele jakosti podle vztahu (2.16).

$$Q = \frac{f_0}{BW} \quad [-; \text{Hz}, \text{Hz}] \quad (2.16)$$

Kde:

Q - činitel jakosti antény

f_0 - rezonanční frekvence

BW - šířka pásma

Tabulka 2.3: Hodnoty analyzovaných obvodů

| Typ obvodu | S11[dB] | BW [kHz] | Q | Srovnání oproti STAR [%] |
|------------|---------|----------|---------|--------------------------|
| L článek | -60,14 | 233 | 116,738 | -2,5 |
| T článek | -45,30 | 218 | 124,771 | -8,79 |
| L+T | -54,71 | 259 | 105,019 | 8,37 |
| Star | -47,62 | 239 | 113,808 | 0 |
| L+L | -45,10 | 201 | 135,323 | -15,90 |

V tabulce (2.3), jsou popsány naměřené parametry analyzovaných obvodů. Prvním krokem je nastavení hodnot komponentů obvodu na rezonanční frekvenci 27.2 MHz. Po jejím nastavení jsou v tabulce uvedeny hodnoty parametru S11 a šířky pásma při poklesu parametru S11 na - 10 dB. Šířka pásma se poté použije pro výpočet jakosti obvodu podle vztahu (2.16), nejlepší jakosti dosáhl podle simulace obvod L + T, naopak nejhorší jakosti dosáhl obvod 6 generace, L+L.

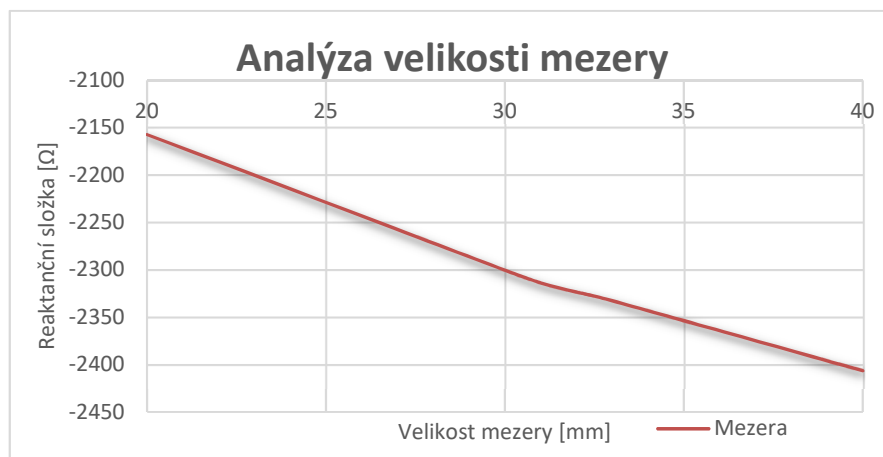
2.3 Analýza vlivu rozměrů na parametry antény

Tato kapitola je zaměřena na pozorování vlivu změn rozměrů zářičů na parametry antény. Příliš velká změna rozměrů však není žádaná, protože hlavním důvodem, proč se daný typ antén používá jsou právě malé rozměry. Ze zmíněných důvodů, kdy v simulačním programu CST nelze simulovat tento typ antény, u které je nutný fázový posun o 90 °. Je sledovaným parametrem pouze reaktanční složka impedance antény. Prvním parametrem, u kterého jsou prováděny změny a je sledováno ovlivnění reaktanční složky, je mezera mezi zářiči. V tabulce (2.4), je ukázána reaktanční složka při změně mezery mezi zářiči.

Tabulka 2.4: Reaktanční složka antény při změně mezery mezi zářiči

| Mezera[mm] | $X_a[\Omega]$ | Srovnání oproti m=32 [%] |
|------------|---------------|--------------------------|
| 20 | -2157,340 | 7,15 |
| 30 | -2300,429 | 0,99 |
| 31 | -2313,899 | 0,41 |
| 32 | -2323,521 | 0 |
| 33 | -2332,656 | -0,39 |
| 40 | -2406,541 | -3,573 |

Z tabulky (2.4) vyplývá, že změna hodnoty mezery mezi zářiči ovlivní reaktanční složku. Ze simulací je patrné, že se zmenšením mezery klesá. Hodnota m popisuje velikost mezery v mm. Nižší hodnota reaktance je žádaná pro zmenšení velikosti kompenzační cívky. Nižší hodnota reaktance také znamená navýšení hodnoty kapacity, její velikostí je ovlivněna šířka pásma. Z analýzy je na obrázku (2.21) sestaven graf.



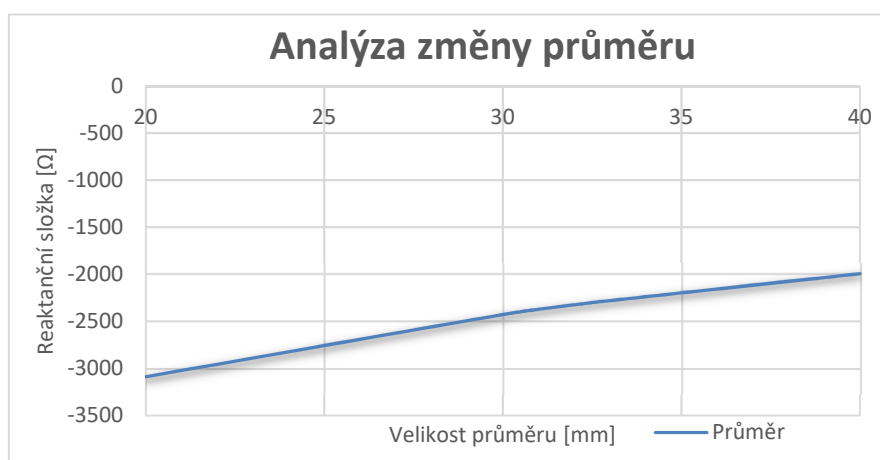
Obrázek 2.21: Graf vlivu změny mezery na reaktanční složku

Z grafu je lépe viditelný vztah mezi mezerou zářičů a reaktanční složkou impedance antény. Dalším parametrem, u kterého je zobrazen vliv změn rozměrů na reaktanční složku, je průměr cylindru. Výsledky jsou zobrazeny v tabulce (2.5).

Tabulka 2.5: Reaktanční složka antény při změně průměru zářičů

| Průměr[mm] | X_a [Ω] | Srovnání oproti d=32 [%] |
|------------|-----------|--------------------------|
| 20 | -3087,010 | -32,86 |
| 30 | -2426,841 | -4,45 |
| 31 | -2371,365 | -2,06 |
| 32 | -2323,521 | 0 |
| 33 | -2278,865 | 1,9 |
| 40 | -1993,531 | 14,20 |

V tabulce (2.5) je možné vidět vliv změny průměru cylindrů na reaktanční složku impedance antény. Konstanta d představuje velikost průměru v mm. Z výsledku lze usoudit, že zvýšením velikosti průměru cylindrů, klesá hodnota reaktanční složky. I v tomto případě je vytvořen graf na obrázku (2.22).



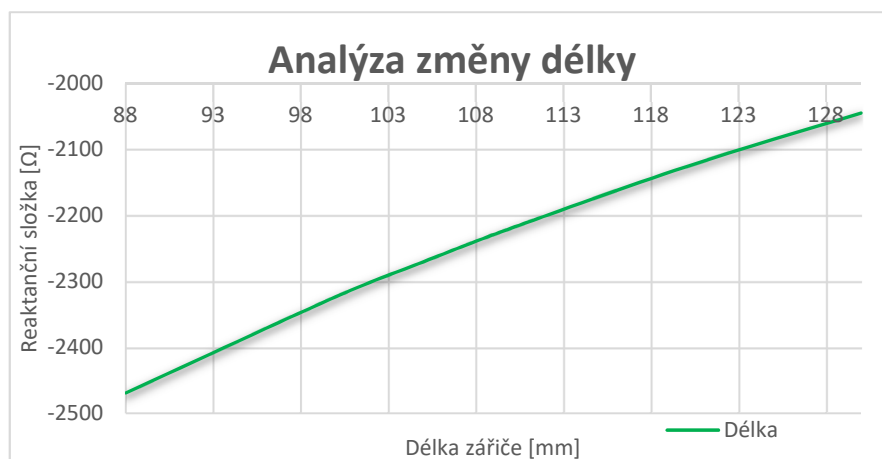
Obrázek 2.22: Graf vlivu změny průměru na reaktanční složku

Posledním analyzovaným parametrem, ovlivňujícím reaktanční složku impedance, je délka cylindru. Analýza je zobrazena v tabulce (2.6).

Tabulka 2.6: Reaktanční složka antény při změně délky zářičů

| Délka[mm] | $X_a[\Omega]$ | Srovnání oproti $l=100$ [%] |
|-----------|---------------|-----------------------------|
| 88 | -2469,088 | -6,28 |
| 100 | -2323,521 | 0 |
| 105 | -2270,198 | 2,29 |
| 110 | -2219,358 | 4,48 |
| 120 | -2126,011 | 8,50 |
| 130 | -2044,411 | 12,01 |

Z tabulky (2.6) vyplívá stejný závěr jako v případě změny průměru zářiče. Pokud se navyšují rozměry délky zářiče, klesá hodnota reaktanční složky impedance antény. Písmeno l představuje délku v mm. Pro lepší přehlednost je i z této analýzy vytvořen graf, který lze vidět na obrázku (2.23).

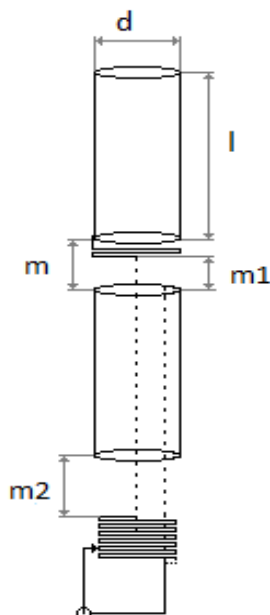


Obrázek 2.23: Graf vlivu změny délky zářiče na reaktanční složku

Na grafu, obrázek (2.23) je možné si lépe představit vliv změny délky cylindrů na reaktanční složku impedance antény. Z výsledku lze zjistit, že pokud se zvýší délka cylindrů, klesá hodnota reaktanční složky.

2.4 Optimalizace rozměrů a stanovení hodnot prvků obvodu STAR

V této části práce jsou popsány již rozměry antény, které jsou použity při praktické realizaci. Jsou zde také uvedeny hodnoty komponentů v přizpůsobovacím obvodu. Jako přizpůsobovací obvod je použit typ STAR, tento obvod se vyznačuje svou jednoduchou stavbou. Nejsou zde použity kondenzátory, ale pouze cívky z toho důvodu je tento obvod často používán. Popisovaný obvod, je také použit u antén, které lze považovat za nástupce EH antén. Nazývanou vektorová Poyntingova anténa, která je dílem stejného autora Teda Harta. Na obrázku (2.24) je ukázáno schéma antény s uvedenými finálními rozměry.



Obrázek 2.24: Schéma konečného návrhu

Na obrázku (2.24) je zobrazeno schéma antény, která je prakticky vytvořena. Konečné rozměry navržené antény jsou uvedeny v tabulce (2.7).

Tabulka 2.7: Konečné rozměry navržené antény [16]

| Parametr | Délka [mm] |
|----------|------------|
| l | 100 |
| d | 32 |
| m | 32 |
| m1 | 16 a víc |
| m2 | 32 |

Nyní jsou stanoveny rozměry antény. Součástí je také přizpůsobovací obvod, u kterého je nutné vypočítat komponenty. V případě obvodu STAR jsou použity dvě cívky, první je cívka fázovací tato cívka kompenzuje vliv vodiče, který vede středem spodního cylindru. Druhá cívka je ladící, pomocí které je zajištěna požadovaná rezonanční frekvence. Nejprve jsou uvedeny vztahy pro zjištění počtu závitů fázovací cívky.

$$l_{\text{vodiče}} = \left(\frac{984}{f_0} \cdot 0,016\right) \cdot 12 \text{ [cm; Hz]} \quad (2.17)$$

Kde:

$l_{\text{vodiče}}$ - potřebná délka vodiče

f_0 - rezonanční frekvence

$$N_{fázovací} = \frac{l}{\pi \cdot d} \quad [-; \text{cm}, \text{cm}] \quad (2.18)$$

Kde:

$N_{fázovací}$ - počet závitů fázovací cívky

d_L - průměr cívky podle průměru nosné novodurové trubky

Pomocí prvního uvedeného vztahu (2.17) se vypočítá potřebná délka drátu na vytvoření cívky. Druhý vztah (2.18) slouží již ke stanovení počtu závitů fázovací cívky. Po provedení výpočtu, je hodnota počtu závitů 1,61. Dále je uveden vzorec pro výpočet počtu závitů ladící cívky.

$$N_{ladící} = \sqrt{\frac{\frac{40 \cdot d_{vodiče} \cdot X_L}{d_{cívky}^2} + \frac{40 \cdot d_{vodiče} \cdot X_L}{d_{cívky}^2} + \frac{4 \cdot 18 \cdot X_L}{d_{cívky}}}{2}} \quad (2.19)$$

Kde:

$N_{ladící}$ - počet závitů ladící cívky

$d_{vodiče}$ - průměr vodiče [cm]

$d_{cívky}$ - průměr cívky [cm]

X_L - reaktance cívky [Ω]

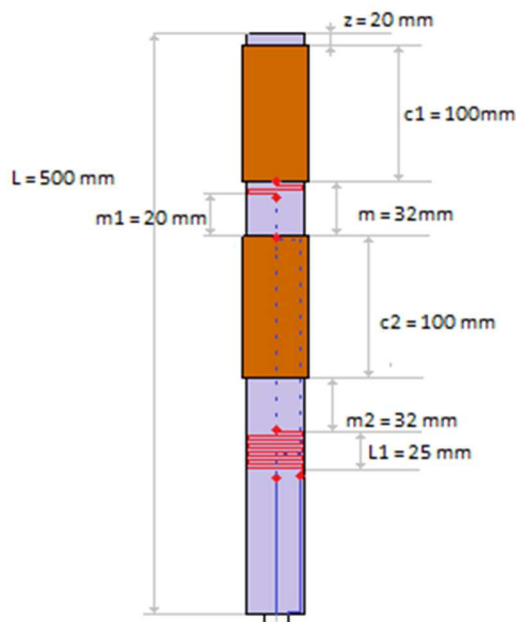
Po dosazení hodnot do vztahu (2.19) vyjde počet závitů 11,87. Tímto jsou vypočítány hodnoty pro sestavení cívek. Použité vzorce pro výpočet jsou sestaveny autorem EH antén panem Tedem Hartem, jenž sestavil společně s dalšími radioamatéry [16]. Následující kapitola se zabývá již samotnou konstrukcí antény.

3 Konstrukce EH antény

Kapitola se zabývá již samotnou stavbou antény, podle popsaných rozměrů v předchozí kapitole. V kapitole je popsán přesný postup, jak provést kompletní konstrukci antény. Pro stavbu je částečně použit návod [16]. Koncept antény je poměrně jednoduchý, ale je potřeba velké trpělivosti a pečlivosti k přesnému nastavení antény. Nejprve jsou sepsány samotné komponenty a potřebné materiály pro stavbu.

- novodurová trubka o délce 500 mm a vnějším průměru 32 mm
- dva měděné plechy o rozměrech 10 x 10,5 cm
- měděný lakovaný drát o průřezu $1,25 \text{ mm}^2$ délka alespoň 2 m.
- koaxiální konektor, v tomto případě typu N [16]
- trafo nebo mikro páječka, cínová pájka, klempířská pájka, kalafuna
- tavná pistole
- elektrikářská páska

Hlavní částí je novodurová nosná trubka, na kterou jsou umístěny všechny komponenty. Trubku je možné zakoupit přímo v délce 500 mm nebo koupit delší a následně ji zkrátit. Poté co je trubka o daných rozměrech připravena, je nutné si nachystat rysky pro vyvrtání otvorů, umístění cylindrů a cívek. Rozmístění otvorů a dalších komponentů je ukázáno na obrázku (3.1)



Obrázek 3.1 : Plánek antény pro nastavení rezonanční frekvence

Pokud jsou nachystány všechny rysky otvorů, vyvrtáme díry o průměru 2 mm. Poté je nutné z měděných plechů vytvořit válce. Plechy mají rozměry 10 x 10,5 cm a kratší strana představuje délku cylindru, delší strana je ohýbána až do tvaru válce. Válce je možné tvarovat přímo na novodurovou trubku, tím je dosažen požadovaný průměr 32 mm. Když jsou již válce vytvarovány a plechy se částečně překrývají, je nutné toto místo připájet. Obyčejná trafo pájka ani mikropájka nedisponuje dostatečnou teplotou, aby byl materiál z mědi dostatečně prohřátý a podařilo se válce spájet. Proto se na toto pájení použije klempířská pájka, která dosahuje dostatečné teploty. Válce jsou při pájení umístěny na novodurové trubce, ať jsou co nejlépe vytvarovány. Z toho důvodu je potřeba pájení provádět velice opatrně, aby nedošlo ke zkroucení novodurové trubky. Na obrázku (3.2) je zobrazen vytvořený válec.



Obrázek 3.2: Zhotovený cylindrový zářič

Nyní je již vše připraveno k sestavení antény. Cylindry je možné po trubce posouvat. Horní cylindr posuneme přibližně 2 cm od horního okraje trubky. Mezera mezi cylindry odpovídá průměru novodurové trubky, tedy 32 mm. Cylindry je nyní potřeba zafixovat, aby nebylo možné měnit jejich polohu, to lze provést přilepením pomocí tavné pistole nebo lepidlem, případně pomocí elektrikařské pásky. Nyní je nutné vytvořit propojky, které spojí cylindry s cívkou. Otvory jsou již vyvrtány, přejdeme tedy k vytvoření první propojky. Ta spojuje ladící cívku s cívkou fázovací, která je spojena s horním cylindrem. Délka této propojky je 152 mm a její konce jsou ohnuty do pravého úhlu, u této propojky je důležité, aby byla vedena středem, proto ohnuté konce musí mít velikost mírně přesahující poloměr novodurové trubky, tedy 16 mm. Umístění propojky do vyvrtaných otvorů, je poměrně pracné a je důležité mít velkou trpělivost. Poté co se podaří první propojku správně umístit, je dále na řadě vytvořit fázovací cívku. Začátek cívky připájíme k hornímu cylindru, opět klempířskou pájkou pro dosažení dostatečné teploty a poté vytvoříme z drátu závity. Výpočty vyšel počet závitů na 1,61, vytvoří se tedy závity 2 a konec cívky se připájí k propojce která je již vytvořena. Nyní přichází na řadu propojka pro druhý cylindr. Délka této propojky je 132 mm a konce jsou opět zahnuty do pravého úhlu. U této cívky není nutné, ať jsou konce stejně dlouhé jako v případě propojky prvního cylindru. Druhá propojka je vedena po vnitřní stěně novodurové trubky. K umístění propojky do vyvrtaných otvorů je opět potřeba trpělivost. Poté co se umístění povede, je třeba konec propojky připájet ke spodnímu cylindru. Nyní se vytvoří propojky pro připojení koaxiálního konektoru. K připojení propojky ke stínění konektoru

slouží otvor vyvrtaný u konce ladící cívky. Tento otvor je umístěn 25 mm od začátku této cívky, propojka je vedena podél stěny novodurové trubky. Druhá propojka propojuje spodní cylindr se středovým vývodem konektoru a je vedena středem novodurové trubky. Všechny potřebné otvory a propojky jsou zobrazeny na obrázku (3.1), kdy otvory jsou zobrazeny jako červená tečka. Po připájení vývodů na koaxiální konektor [17], je následně na novodurovou trubku připevněn pomocí tavné pistole zmíněný konektor obrázek (3.3).



Obrázek 3.3: Upevnění koaxiálního konektoru

Nyní je potřeba vytvořit ladící cívku, ta má mít podle výpočtů počet závitů 11,87. Vytvoří se alespoň o dva závitů více a poté se podle potřeby upraví. Začátek cívky se připájí k druhému konci propojky horního cylindru a poté se vytvoří 14 závitů pomocí lakovaného drátu o průměru 1,25 mm, kdy se závitů umísťují těsně vedle sebe. Konec cívky se připájí k propojce, která vede ze stínění koaxiálního kabelu. Nyní je již anténa sestavena a připravena k připojení analyzátoru pro zjištění rezonanční frekvence. Při nastavování požadované frekvence v tomto případě 27,2 MHz je potřeba upravovat ladící cívku. Při kmitočtu vyšším než požadovaná frekvence, je potřeba závit přidat. A v případě opačném tedy, že je kmitočet nižší než rezonanční frekvence závit ubrat. Správný rezonanční kmitočet byl získán při počtu závitů ladící cívky 12. Po získání požadované frekvence je nutné obvod upravit podle obrázku (3.4).



Obrázek 3.4 : Finální plánek antény

Obrázek (3.4) se liší od předchozího obrázku (3.1) v připojení propojek konektoru. V tomto případě po nastavení požadované rezonanční frekvence, připojíme ke stínění konektoru konec cívky a také konec propojky se spodním cylindrem. Ke středovému vodiči se připojí odbočka, na ladící cívce na obrázku je vytvořena černou čarou. Ta je nejprve připájena na druhý závit od spodní části cívky a poté se dle potřeby přemisťuje, ať je zajištěno co nejlepší impedanční přizpůsobení. Tedy ideálně reálná část na hodnotu $50\ \Omega$ a imaginární část na hodnotu 0, což je impedance koaxiálního kabelu. Hodnoty se opět měří pomocí anténního analyzátoru. Nejlepší přizpůsobení je nastaveno při připájení odbočky na téměř konec druhého závitu. Tím je anténa zkompletována obrázek (3.5).



Obrázek 3.5: Vytvořený model EH antény

4 Měření zkonstruované antény

V této kapitole je popsáno samotné měření vytvořeného modelu EH antény a také popsány výsledky. Měření je prováděno na zadaném kmitočtu 27,2 MHz, a to pomocí dvou anténních analyzátorů. Prvním typem je analyzátor RigExpert AA-520, druhým typem je vektorový analyzátor SDR-Kits. Před začátkem měření je důležité správně umístit anténu, aby nedošlo k ovlivnění okolním prostorem a okolními předměty. Proto je anténa umístěna ve volném prostoru, kde se nenachází žádné kovové předměty, které můžou způsobit odrazy signálu. V tomto případě je anténa zavěšena na strom ve výšce přibližně dva metry nad zemí, z důvodu magnetického pole země. Také je potřeba dostatečná vzdálenost umístění analyzátoru od antény, je tedy nutné mít dostatečně dlouhý koaxiální kabel. Přítomnost obsluhy v blízkosti antény výrazně ovlivňuje PSV.

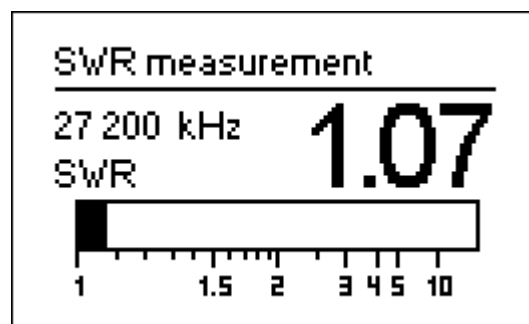
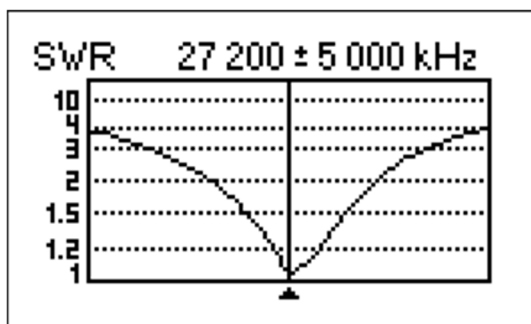
4.1 Měření pomocí anténního analyzátoru RigExpert

Jak je popsáno na začátku této kapitoly, prvním anténním analyzátozem je RigExpert. U tohoto typu je možné měřit v kmitočtovém pásmu 1 MHz až 520 MHz. Tento typ analyzátoru, není nutné kalibrovat před každým měřením. Stačí pouze občasná kalibrace, která je poté zachována. Samotný analyzátor je zobrazen na obrázku (4.1).

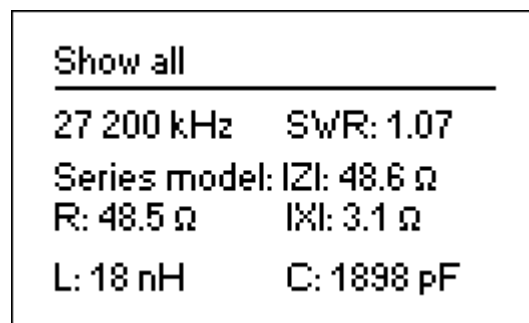
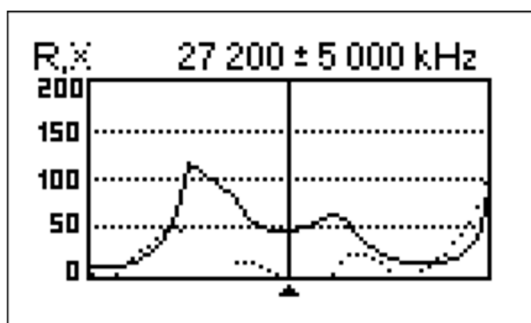


Obrázek 4.1: Anténní analyzátor RigExpert

U tohoto analyzátoru, nelze změřit hodnotu parametru S_{11} , ale je možné zobrazit hodnotu PSV graficky i číselně. Nejlepší hodnoty změřené tímto analyzátozem je $PSV = 1,07$, což je velmi dobrý výsledek. Další parametry, které je schopen analyzátor změřit jsou reálná a imaginární část impedance. Z výsledku je patrné, že reálná část se téměř rovná požadované hodnotě $50\ \Omega$ a imaginární část se blíží k nule. Hodnota imaginární části je také převedena na hodnotu indukčnosti a kapacity. Změřené parametry analyzátoru jsou zobrazeny na obrázcích (4.2, 4.3).



Obrázek 4.2: Graficky a číselně znázorněna hodnota PSV



Obrázek 4.3: Graficky znázorněna Re a Im složka, všechny parametry

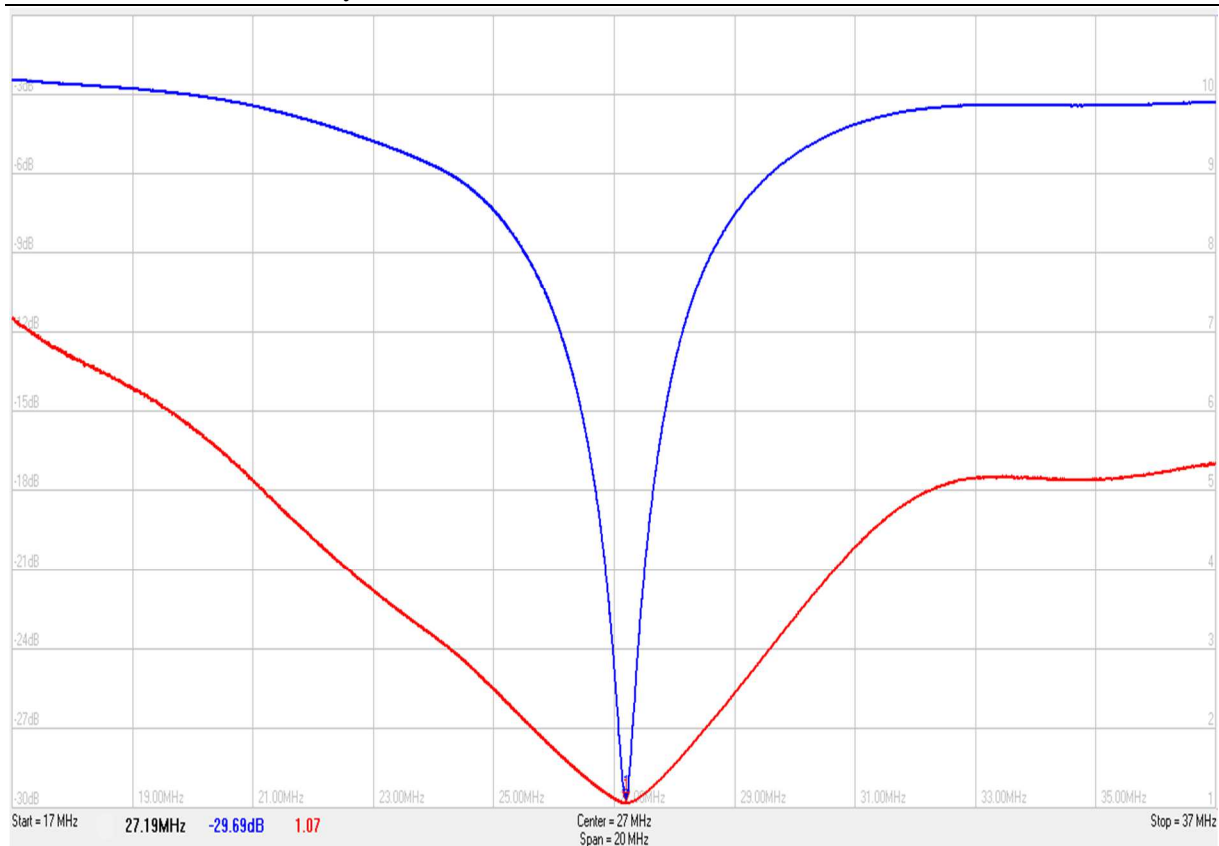
4.2 Měření pomocí vektorového analyzátoru SDR-Kits

Před samotným měřením je nejprve nutné tento analyzátor zkalibrovat, pomocí kalibrační sady dodávané k přístroji. Kalibrace spočívá v nastavení analyzátoru při zapojení naprázdno, nakrátko a poté při zapojení zatěžovacího odporu o přesné hodnotě 48,09 Ω . Po této kalibraci je nutné ji uložit a poté ji v případě opětovného měření znovu načíst. Analyzátozem lze měřit v kmitočtovém rozsahu 1 kHz až 1,3 GHz. Obsahuje také širokou škálu parametrů, které lze měřit a zobrazit je jak číselně, tak také graficky. Analyzátor je zobrazen na obrázku (4.4). Na obrázku (4.5 a 4.6) jsou zobrazeny změřené průběhy antény.

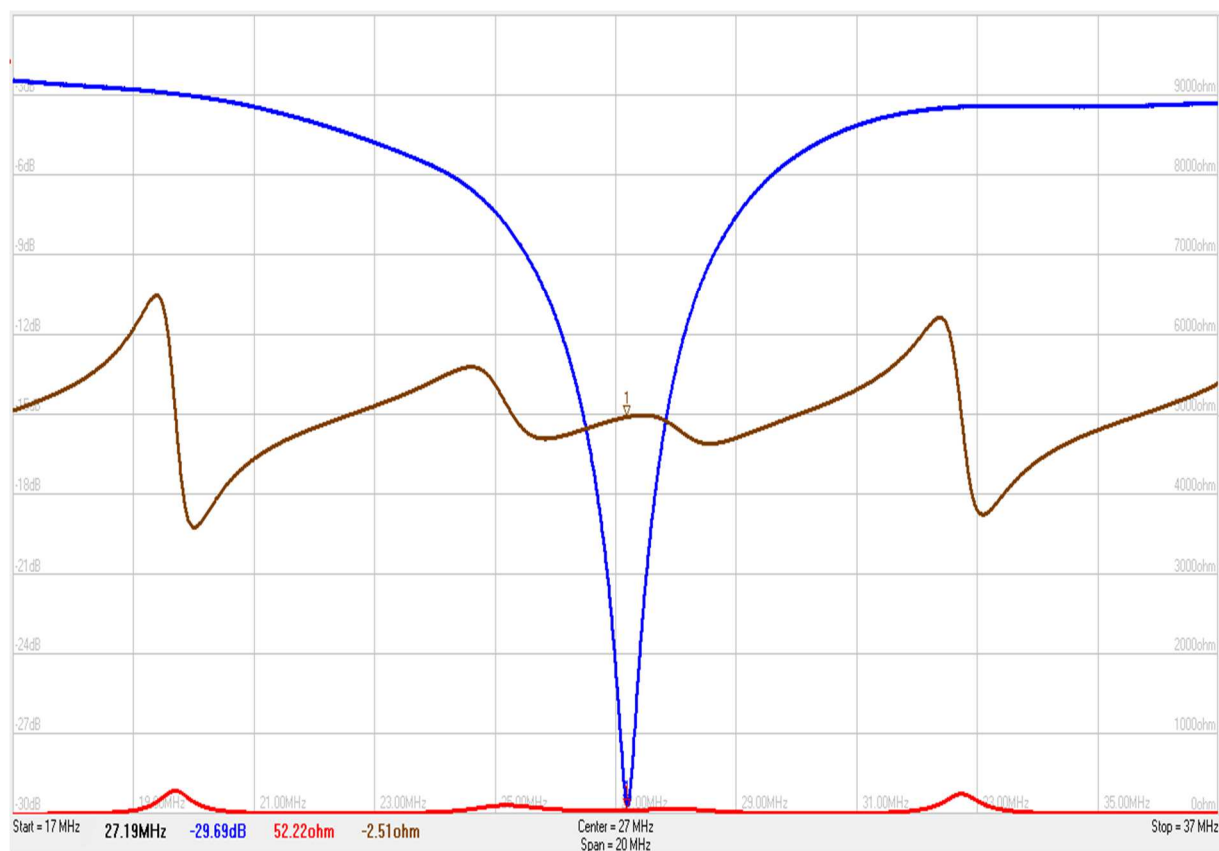


Obrázek 4.4: Vektorový analyzátor SDR-Kits s kalibrační sadou

Měření zkonstruované antény



Obrázek 4.5: Průběh S_{11} a PSV



Obrázek 4.6: Průběh S_{11} , reálné a imaginární složky impedance

Na prvním grafu obrázek (4.5), jsou zobrazenými parametry rezonanční frekvence černou barvou, modře je parametr S11 a červeně PSV. Lze vidět, že nastavená rezonanční frekvence je téměř požadovaná hodnota a to na 27,19 MHz. Hodnota PSV vychází stejně jako v případě použití analyzátoru RigExpert a to 1.07. Tímto analyzátozem je také možné změřit hodnotu parametru S11, která dosáhla hodnoty -29,69 dB. V případě druhého grafu obrázek (4.6) je opět černou barvou zobrazena rezonanční frekvence, modrou parametr S11. Dalšími zobrazenými parametry je barvou červenou reálná část impedance a barvou hnědou imaginární část impedance. Hodnoty impedancí se nepatrně liší oproti měření analyzátozem RigExpert.

4.3 Měření indukčnosti cívky pomocí RLC můstku

V této části je provedeno praktické měření indukčnosti ladící cívky, pro ověření, zda tato hodnota je přibližně stejná jako v případě výpočtu. Pro měření je použit RLC můstek ELC-3131 D obrázek (4.10). Pro výpočet hodnoty indukčnosti je použit vztah (1.17).

$$L = N^2 \cdot d \cdot k \Rightarrow L = 12^2 \cdot 3,2 \cdot 0,00915 = 4,511 \mu\text{H}$$



Obrázek 4.7: RLC můstek ELC-3131 D [18]

Vypočítaná hodnota indukčnosti ladící cívky je 4,511 μH , naměřená hodnota pomocí RLC můstku je 4,6 μH . Z toho je patrné, že změřená hodnota indukčnosti téměř odpovídá vypočítané teoretické hodnotě, kdy ve výpočtu nejsou zahrnuty všechny vlivy, které se vyskytují v reálném zapojení, proto je zde tento nepatrný rozdíl.

4.4 Praktické ověření činnosti antény

Po ověření funkce antény pomocí anténních analyzátorů, je také provedena praktická zkouška, kdy se anténa připojí k rádiové stanici. Použitá rádiová stanice je značky Kenwood a je zobrazena v příloze. Při této praktické zkoušce, byla nastavena požadovaná rezonanční frekvence, tedy 27,2 MHz. Zabudovaný PSV metr této radiové stanice ukazoval hodnotu 1, to je nutno brát s rezervou. Následné pokusy o zachycení aktivního vysílání, kterým by se ověřila poslechová zkouška, byli neúspěšné. Důvodem může být, že CB pásmo tedy oblast okolo 27 MHz, není již v současné době příliš aktivní. Dalším možným důvodem může být, zvolení nevhodného času, kdy praktické ověřování probíhalo.

5 Zhodnocení dosažených výsledků

V práci jsou zaznamenány matematické vzorce pro výpočet rozměrů EH antény. Výpočty vyzařovacích prvků antény, se týkají zářiče tvaru válce. Pro jiné typy zvolených tvarů zářiče, je potřeba zvolit rozměry přibližně stejné jako z výsledků válcového zářiče. Tento tvar zářiče je preferován díky poměrně snadné konstrukci, a hlavně díky konečným kompaktním rozměrům celé antény.

Hlavní náplní práce jsou simulace v programu CST. Bohužel při tvorbě simulací bylo zjištěno, že tento program není vhodný pro tvorbu simulací tohoto typu antény. V případě EH antén je nutné dosáhnout fázového posunu mezi E a H polem o 90° . Toho není program schopen. Důsledkem toho nemohly být vytvořeny všechny simulace, které byly zamýšleny. Provedené simulace několika tvarů zářiče ukázaly, že směrové charakteristiky se pro jednotlivé tvary téměř neliší. Sledovaným parametrem byla imaginární část impedance, nejlepší hodnoty reaktanční složky dosáhl zářič ve tvaru kužele. Avšak tento zářič měl ve výsledku nejnižší účinnost vyzařování. Z toho důvodu a také náročnosti při tvorbě zářiče tohoto tvaru, byl vybrán zářič tvaru válce. Následná analýza vlivu změn rozměrů na reaktanční složku impedance ukázala, že při navyšování rozměru zářiče dochází ke zlepšení parametrů. Jedná se o snížení hodnoty reaktanční složky, tím zvýšení kapacity zářičů což má za následek zvýšení šířky pásma. Z toho vyplývá, čím větší rozměry zářičů budou zvoleny, tím snáze půjde anténa naladit. Další analýza zahrnovala přizpůsobovací obvody. Zde se projevila nejvíce nevhodnost programu pro tento typ antény, navržené obvody nebylo možné přímo připojit k modelům antény. A to z důvodu malého vyzařovacího odporu, který je způsoben nedodáním fázového posunu o 90° mezi zářiče. Místo antény je připojen náhradní obvod antény. Provedené simulace tedy neodpovídají přímo vytvořenému modelu, kdy imaginární část odpovídá změřené hodnotě v programu, ale reálná část je zvolena jako teoretická a to $30\ \Omega$. U této analýzy jsou také použity jednoduché rezonanční obvody typu L a T. V praktické realizaci by však nebyli příliš vhodné.

Z důvodu jednoduché stavby a dostupnému matematickému aparátu. Byl pro praktickou realizaci zvolen přizpůsobovací obvod STAR. V obvodu jsou pouze dvě cívky bez použití kondenzátoru. Na webové stránce [16] jsou popsány návody pro konstrukci antény tohoto typu, avšak uvedené návody nejsou určeny pro požadované frekvenční pásmo. Z toho důvodu je zde také ke stažení program, pomocí kterého lze vypočítat potřebné hodnoty. Rozměr novodurové trubky byl zvolen, podle již konstruovaných modelů této antény. Nicméně bylo by možné tento rozměr zmenšit, kdy hlavně ve spodní části je nadbytek volného místa. Při konstrukci je nutné dodržet umístění propojek cylindrů uvnitř nosné trubky. Propojka horního cylindru musí vést středem a propojka spodního cylindru po vnitřní straně novodurové trubky. Ladící cívku bylo nutné při ladění několikrát předělávat pro dosažení požadované rezonanční frekvence. Samotné ladění je opravdu velmi pracné a je otázkou trpělivosti.

Po zkonstruování antény a jejím přesném naladění na rezonanční kmitočet 27.2 MHz. Jsou uvedeny výsledky měření pomocí dvou analyzátorů. První anténní analyzátor RigExpert je jednodušší typ, který nedisponuje velkým množstvím funkcí. Hlavním parametrem změřeným tímto typem je PSV. Změřená hodnota 1,07 je velmi dobrý výsledek a znamená, že je anténa téměř ideálně přizpůsobena. Že se jedná o vynikající výsledek je možné zjistit z tabulky popisované v úvodu práce. Dalšími změřenými parametry jsou reálná a imaginární složka impedance, jejich hodnota $48,5 - j3,1\ \Omega$ se téměř rovná požadované hodnotě koaxiálního kabelu $50 + j0$. Druhý vektorový analyzátor umožnil vykreslit

grafy průběhů. Umožnil hlavně vykreslit průběh parametru S_{11} , hodnota -29,69 je výborná. Minimální dostačující hodnota je - 10 dB to znamená, že změřená hodnota je téměř trojnásobně lepší. Pokud se na parametru S_{11} provede pokles o 3 dB, vyjde šířka pásma 670 kHz, což je plně postačující pro celou oblast CB pásma. Naměřená hodnota PSV je opět 1,07, z toho vyplývá, že je konstrukce antény stabilní. Z grafu impedance vytvořeným jak analyzátozem RigExpert, tak SDR- kits. Lze vidět, že se nepotvrdil teoretický předpoklad, kdy reálná hodnota impedance by v místě rezonance měla dosahovat maxima. Praktická poslechová zkouška se bohužel nepodařila zrealizovat z důvodu neaktivity na CB pásmu v době ověřování. Po kompletním zrealizování antény je uveden závěr, že anténa je při stavbě silně individuální. Kdy při opětovné stavbě, u které budou použity stejné materiály a rozměry antény. Není zajištěno, že bude docíleno stejných výsledků. Také je pro měření potřeba umístění antény ve volném prostoru a dostatečná vzdálenost obsluhy od antény. Oba tyto faktory silně ovlivňují měřené parametry.

6 Závěr

V prvním bodě, bylo úkolem této práce uvést stručný popis k teorii EH antén. V této kapitole je nejprve popsán základní princip, jak EH antény fungují. Dále jsou zde uvedeny používané typy vyzařovacích prvků antény. Následně jsou také popsány používané přizpůsobovací obvody, které jsou dílem hlavního tvůrce EH antén Teda Harta. U každého typu obvodu je stručně uvedeno, jak daný obvod zajistí potřebnou vzájemnou kolmost dvou rovin, tedy magnetického a elektrického pole. Poté je zde uveden základní matematický aparát pro výpočet konstrukčních prvků antény.

Druhá kapitola práce je věnována simulaci antény v programu CST microwave studio. Nejprve jsou zde vytvořeny vyzařovací prvky antény o tvarech válce, kuželu, obdelníku, čtverce a trojúhelníku. U všech modelů jsou uvedeny jejich vyzařovací charakteristiky, celková a vyzařovací účinnost. Tyto účinnosti jsou u všech zmíněných typů malé, z důvodu nenastavení antény na rezonanční kmitočet 27,2 MHz. Z modelovaných typů zářičů, dosáhl nejlepšího výsledku zářič ve tvaru válce. Ten je použit pro následné analýzy. Analýzou je myšleno zkoumání vlivu změn rozměrů zářiče na parametry. Analyzovanými rozměry jsou délka, průměr a mezera mezi zářiči. Parametrem, u kterého je sledován vliv změny rozměrů je imaginární část impedance antény. Důvodem je nemožnost programu dosáhnout potřebného fázového posunu. Důsledkem toho vychází reálná část impedance neodpovídající skutečnosti. Po provedení analýz rozměrů zářičů, následuje vytvoření několika typů přizpůsobovacích obvodů v témže programu. Tyto obvody ze zmíněných důvodů připojeny na sériovou kombinaci kondenzátoru a odporu, což odpovídá náhradnímu schématu antény. U všech vytvořených obvodů jsou poté uvedeny výsledky simulací pomocí grafu a také číselné hodnoty parametru S11, hodnoty šířky pásma a posledním je vypočítaná hodnota jakosti obvodu. V závěru kapitoly jsou uvedeny konečné rozměry a vypočítané hodnoty pro stavbu antény, kdy jako přizpůsobovací obvod je použita varianta STAR, tedy jeden z patentů Teda Harta.

Ve třetí kapitole je uvedena konstrukce antény. Jako první jsou uvedeny potřebné komponenty a materiály pro konstrukci. Dále je zde kompletně popsán postup, jak sestavit anténu do finální podoby.

Čtvrtá kapitola je věnována již měření antény nejprve pomocí anténního analyzátoru RigExpert. Výsledná hodnota PSV je 1,07, což je vynikající hodnota a anténa je dobře přizpůsobena. To je také vidět v naměřených výsledcích tohoto analyzátoru, kdy změřená hodnota impedance je 48,5 Ω . Druhým použitým je vektorový analyzátor SDR-Kits, který disponuje a nabízí více funkcí než v případě RigExpertu. U tohoto analyzátoru je nejlepší změřenou hodnotou PSV 1.07, tedy stejná hodnota jako při použití prvního analyzátoru. Jednou z funkcí, která je zde k dispozici, je také měření parametru S11 výsledná hodnota je -29,69 dB. Po měření parametrů antény, je také změřena skutečná indukčnost ladící cívky, která je porovnávána s výpočtem. Změřená indukčnost má hodnotu 4,6 μH v porovnání s vypočítanou hodnotou je nepatrně vyšší, a to z důvodu dalších jevů, které nejsou ve výpočtech zahrnuty. Vypočítaná hodnota je 4,511 μH . V poslední části je uvedena také praktická zkouška pomocí rádiové stanice, kdy je nejprve nastaven požadovaný rezonanční kmitočet, u kterého vnitřní PSV metr ukazoval hodnotu 1. Bohužel v čase, kdy byla realizace prováděna nebylo žádné aktivní vysílání.

Použitá literatura

- [1] Robert T. Hart, EH antenna [online]. 2002 - [cit.15.2.2017]. Dostupné na [www: https://google.com/patents/US6486846](http://www.google.com/patents/US6486846)
- [2] Robert T. Hart, Method and apparatus for creating an EH antenna [online]. 2005 - [cit.15.2.2017]. Dostupné na [www: https://google.ch/patents/US6864849](http://www.google.ch/patents/US6864849)
- [3] Robert T. Hart, Coaxial inductor and dipole EH antenna [online]. 2005 - [cit.15.2.2017]. Dostupné na [www: https://google.ch/patents/US6956535](http://www.google.ch/patents/US6956535)
- [4] Antenna-theory: S-Parameters. Antenna Theory [online]. 2008 [cit. 16.2.2017]. Dostupné na [www: http://antenna-theory.com/definitions/sparameters.php](http://antenna-theory.com/definitions/sparameters.php)
- [5] Amateur radio station: Co znamená SWR [online]. 2015 [cit. 16.2.2017]. Dostupné na [www: https://sites.google.com/site/ok1dkz/technical/co-znamená-swr](https://sites.google.com/site/ok1dkz/technical/co-znamená-swr)
- [6] Učíme v prostoru [online]. Parametry antén, 2013 - [cit. 18.2.2017]. Dostupné na [www: http://uvp3d.cz/dum/?page_id=2652](http://uvp3d.cz/dum/?page_id=2652)
- [7] Pavel Svoboda, Antény a magie kolem nich [online]. Aeroweb, 2008 - [cit. 18.2.2017]. Dostupné na [www: http://www.aeroweb.cz/clanky/1231-](http://www.aeroweb.cz/clanky/1231-)
- [8] Ted Hart, Introduction to EH antennas [online]. 2005 - [cit. 20.2.2017]. Dostupné na [www: http://ehant.qrz.ru/book.pdf](http://ehant.qrz.ru/book.pdf)
- [9] Ted Hart, Paul Birke, The Poynting Vector Antenna. BookBaby, 2016, ISBN-13: 978-1483575766
- [10] HART, T. EH antenna systems [online]. EH Antenna Systems, LLC, 2008 - [cit. 25.2.2017]. Dostupné na [www: http://eh-antenna.skyserver.net](http://eh-antenna.skyserver.net)
- [11] Access server. Jevy ovlivňující útlum vedení [online]. 2004 - [cit. 26.2.2017]. Dostupné na [www: http://access.feld.cvut.cz/view.php?cislocclanku=2004120201](http://access.feld.cvut.cz/view.php?cislocclanku=2004120201)
- [12] Pandatron, Elektrotechnický magazín. Výpočet cívek [online]. 2005 - [cit.16.3.2017]. Dostupné na [www: http://pandatron.cz/?209&vypocet_civek](http://pandatron.cz/?209&vypocet_civek)
- [13] CST - Computer Simulation Technology [online]. Webové stránky CST, 2016 - [cit.16.3.2017]. Dostupné na [www: https://www.cst.com](https://www.cst.com)
- [14] Ted Hart, EH antenna the book [online]. 2002 - [cit.18.3.2017]. Dostupné na [www: http://kambing.ui.ac.id/onnopurbo/orari-diklat/teknik/antenna/eh-antenna/eh-antenna-book/EH%20antenna%20-%20the%20Book.pdf](http://kambing.ui.ac.id/onnopurbo/orari-diklat/teknik/antenna/eh-antenna/eh-antenna-book/EH%20antenna%20-%20the%20Book.pdf)
- [15] Novák Josef. Přizpůsobovací články - dodatek. Radioamatér [online]. 2001, c. 3, s 24-26 [cit.25.3.2017]. Dostupné na [www: http://radioamater.cz/cisla/pdf/2001-3-3.pdf](http://radioamater.cz/cisla/pdf/2001-3-3.pdf)
- [16] Larry Brown, EH antenna [online]. 2011 [cit. 29.3.2017]. Dostupné na [www: http://wb5cxc.com/ehantenna.html](http://wb5cxc.com/ehantenna.html)

- [17] Elektronický katalog koaxiálních konektorů. GES-ELECTRONICS a.s.,2001- 2017 - [cit.12.4.2017]. Dostupné na www: <https://ges.cz/cz/nc-1462-GES06700238.html>
- [18] Escort ELC 3131 D, RLC můstek [online]. 2007 [cit. 12.4.2017]. Dostupné na www: <http://rlocman.ru/op/tovar.html?di=61504&/ELC-3131D>

Seznam příloh

Příloha č.1 - EH anténa

Příloha č.2 - Průběh parametru S_{11} a PSV

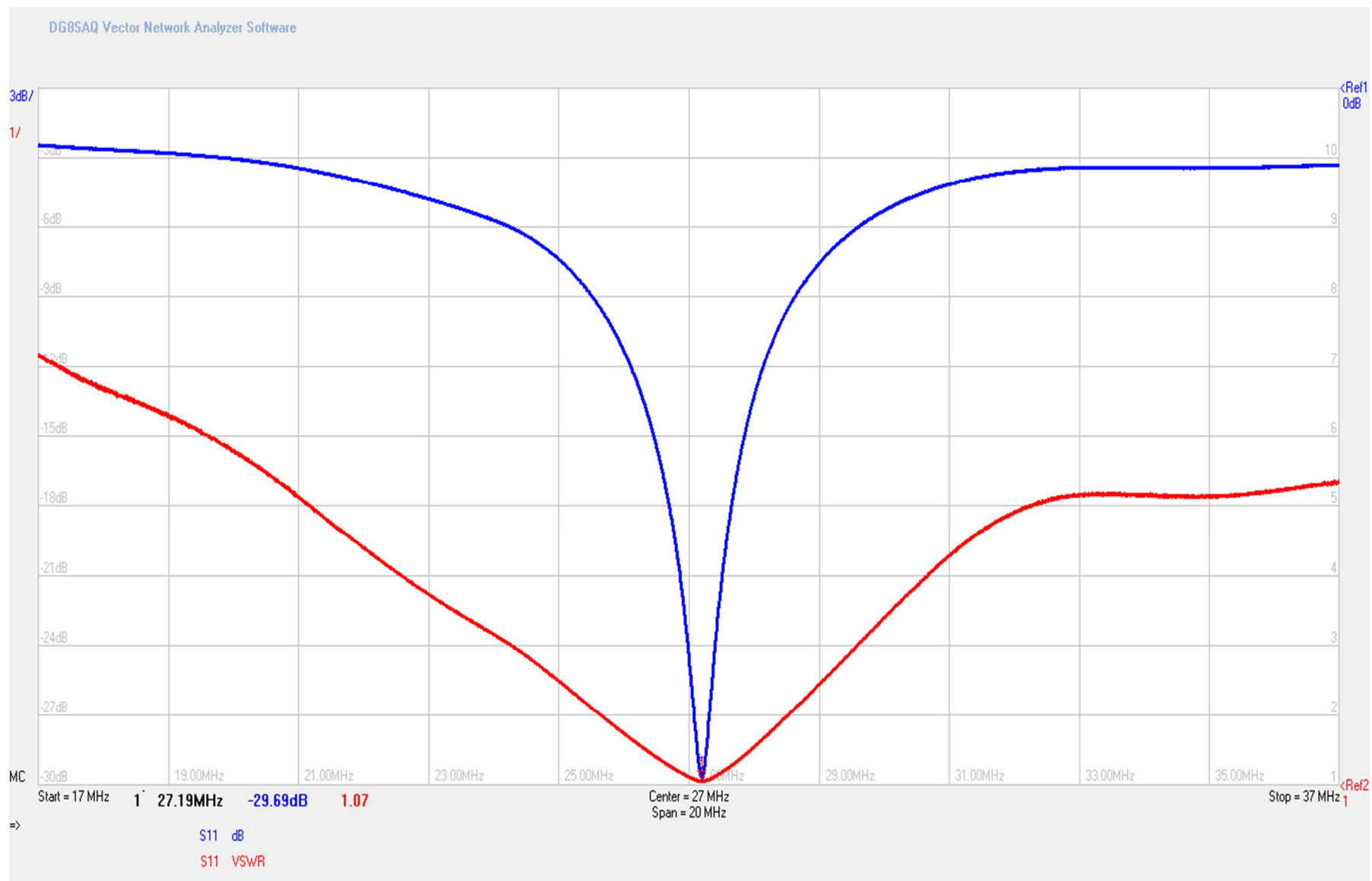
Příloha č.3 - Průběh parametru S_{11} a reálné, imaginární impedance

Příloha č.4 - Fotografie rádiové stanice

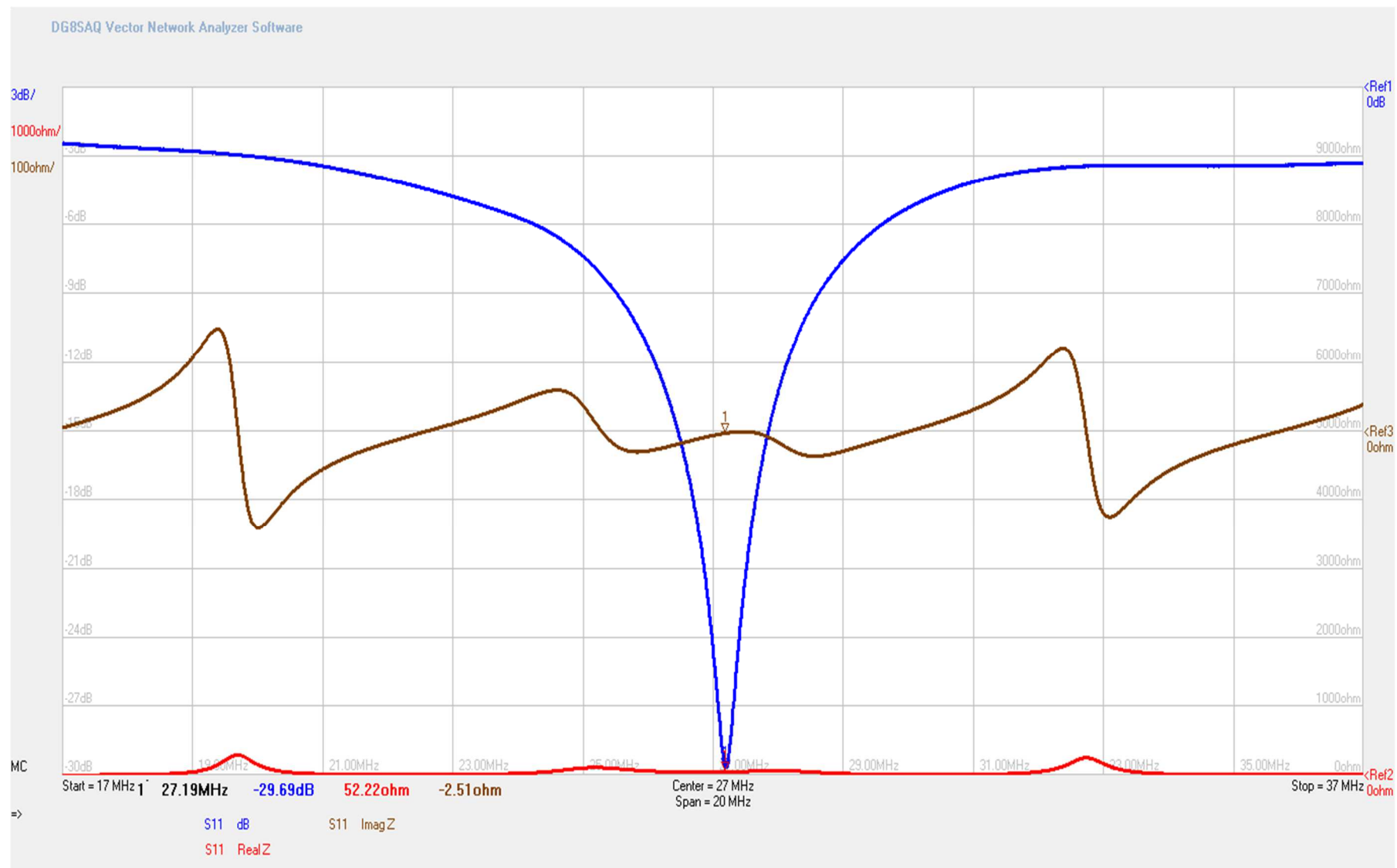
Příloha č.5 - Tabulka činitele poměru průměru a délky cívky



Příloha č.1



Příloha č.2



Příloha č.3



Příloha č. 4

| Poměr d/l | Činitel K |
|-----------|-----------|
| 0,3 | 0,002617 |
| 0,4 | 0,003355 |
| 0,5 | 0,00404 |
| 0,6 | 0,00467 |
| 0,7 | 0,00526 |
| 0,8 | 0,00582 |
| 0,9 | 0,00631 |
| 1 | 0,00680 |
| 1,2 | 0,00767 |
| 1,4 | 0,00845 |
| 1,6 | 0,00915 |
| 1,8 | 0,00979 |
| 2 | 0,01037 |
| 2,1 | 0,01065 |
| 2,2 | 0,01091 |
| 2,3 | 0,01117 |
| 2,4 | 0,01141 |
| 2,5 | 0,01164 |
| 2,7 | 0,01209 |
| 3 | 0,01271 |

Příloha č.5 [12]